

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR PALOTINA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS

**DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO A PARTIR DA ENERGIA VERTIDA TURBINÁVEL DE
ITAIPU E SUA UTILIZAÇÃO EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS**

Aluna: Vanessa Rossato Bach
Orientador: Carlos Henrique Coimbra Araujo

PALOTINA – PR
Agosto de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR PALOTINA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS

**DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO A PARTIR DA ENERGIA VERTIDA TURBINÁVEL DE
ITAIPU E SUA UTILIZAÇÃO EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS**

Aluna: Vanessa Rossato Bach
Orientador: Carlos Henrique Coimbra Araujo

“Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Superior de Tecnologia
em Biocombustíveis – UFPR Setor Palotina,
como requisito parcial para obtenção de grau
de **Tecnólogo em Biocombustíveis**.”

PALOTINA – PR
Agosto de 2013

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força, coragem e perseverança para realizar este trabalho.

Agradeço à minha família, pela paciência e pelo apoio que tem me dado até hoje.

Aos meus professores da Universidade Federal do Paraná, que contribuíram para a minha formação acadêmica, em especial ao professor Carlos Henrique Coimbra de Araujo, pela orientação e auxílio ao decorrer deste trabalho e de todos os anos da minha formação acadêmica, não medindo esforços sempre que precisei.

À Fundação Parque Tecnológico de Itaipu, pela oportunidade em realizar o estágio; ao Ricardo José Ferracin e Nelinho Davi Graef, pela dedicação e ensinamentos a respeito do tema desenvolvido.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação. Muito obrigada!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. HIDROGÊNIO	4
2.1.1. Propriedades	4
2.1.2. Produção	4
2.1.3. Eletrólise da Água.....	6
2.1.4 Eletrolisadores	12
2.1.5. Armazenamento.....	16
2.2. HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL	20
2.2.1. Células a combustível.....	20
2.2.1.1. PEMFC – Membrana de Troca de Prótons.....	25
2.2.2. Motores de combustão interna	27
2.3. O HIDROGÊNIO E A USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5. CONCLUSÃO.....	466
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama do processo de eletrólise da água.....	7
FIGURA 2 - Curvas de voltagem versus temperatura para a eletrólise.....	9
FIGURA 3 – Custo para produção de H_2 através da eletrólise da água	12
FIGURA 4 – Esquema de um eletrolisador unipolar (tipo tanque).....	14
FIGURA 5 – Esquema de um eletrolisador bipolar (filtro prensa).....	14
FIGURA 6 - Representação esquemática do eletrolisador PEM	16
FIGURA 7 - Estação de armazenamento de hidrogênio em Hamburg.....	17
FIGURA 8 – Perdas de energia na compressão do hidrogênio.....	19
FIGURA 9 - Perdas de energia na liquefação de hidrogênio	20
FIGURA 10 - Célula a Combustível utilizada no programa Apollo da NASA.....	21
FIGURA 11 - Representação de uma célula a combustível.	22
FIGURA 12 – Diagrama esquemático de uma Célula a Combustível tipo PEM.....	26
FIGURA 13 - Variação da eficiência térmica do motor a gasolina para diferentes percentuais de hidrogênio.	31
FIGURA 14 – Efeito da mistura do hidrogênio na eficiência do motor a etanol.....	32
FIGURA 15 - Variação das emissões de NO_x para diferentes porcentagens de hidrogênio.....	33
FIGURA 16 – Usina Hidrelétrica de Itaipu	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principais fontes, processos e tipos de energia utilizadas na obtenção do H ₂	5
TABELA 2 - Principais processos de produção industrial do H ₂ e suas reações globais.	6
TABELA 3 - Variação da eficiência com a tensão de operação e consumo de energia	10
TABELA 4 - Densidade de energia do hidrogênio <i>versus</i> a de outros portadores de energia.	18
TABELA 5 - Características das Células a Combustível	23
TABELA 6 – Vantagens e desvantagens das Células a Combustível	24
TABELA 7 - Propriedades do hidrogênio combustível em comparação com a gasolina.....	29
TABELA 8 – Energia vertida turbinável de Itaipu.	37
TABELA 9 – Produção de hidrogênio a partir da EVT de Itaipu.	38
TABELA 10 – Consumo anual de hidrogênio por ônibus a célula a combustível.	38
TABELA 11 – Consumo anual de hidrogênio por carro a célula a combustível.	38
TABELA 12 – Desempenho de um veículo a ETH ₂	39
TABELA 13 – Consumo anual de hidrogênio por veículo a etanol.....	39
TABELA 14 - Desempenho de um veículo a GAH ₂	40
TABELA 15 - Consumo anual de hidrogênio por veículo a gasolina.	40
TABELA 16 - Desempenho de um veículo a DIH ₂	41
TABELA 18 – Total de carros por ano abastecidos a partir da EVT média (2000 – 2012).	41
TABELA 19 - Total de carros por ano abastecidos a partir da EVT de 2012.	42
TABELA 20 – Percentual de carros por ano abastecidos a partir da EVT média (2000 – 2012).	42
TABELA 21 – Percentual da frota por ano abastecida a partir da EVT de 2012.	43
TABELA 22 – Total de ônibus abastecidos por ano com a EVT média (2000 – 2012).	43
TABELA 23 - Total de ônibus abastecidos por ano a partir da EVT de 2012.....	44
TABELA 24 – Percentual de ônibus abastecidos por ano com a EVT média (2000 – 2012).	44
TABELA 25 – Percentual de ônibus abastecidos por ano a partir da EVT de 2012.	44

LISTA DE ABREVIACÕES

H_2 : Hidrogênio

O_2 : Oxigênio

TCC: Trabalho de conclusão de curso

EVT: Energia Vertida Turbinável

g/mol: Gramas por mol

PEM: *Proton Exchange Membrane*

m³: Metro cúbico

kg: Quilogramas

L: Litro

mm: Milímetros

°C: Graus Celcius

K: Kelvin

H^+ : Próton

OH^- : Íon hidróxido

KOH: Hidróxido de potássio

ΔG : Variação da energia livre de Gibbs

V: Tensão

kWh: Quilowatt-hora

Nm³: Newton metro cúbico

GH_2 : Hidrogênio no estado gasoso

LH_2 : Hidrogênio no estado líquido

MJ/kg: Mega Joules por quilograma

RON: Índice de octanos

m/s: Metros por segundo

CaC: Célula a combustível

AFC: Célula a combustível alcalina

PEMFC: Célula a combustível de membrana de troca de prótons

PAFC: Célula a combustível de ácido fosfórico

MCFC: Célula a combustível de carbonato fundido

SOFC: Célula a combustível de óxido sólido

RESUMO

Diante do atual panorama energético e ambiental, a sociedade busca reduzir os impactos ambientais decorrentes principalmente do uso de combustíveis fósseis. Neste trabalho optou-se por analisar uma alternativa de aproveitamento da denominada Energia Vertida Turbinável da Usina Hidrelétrica Itaipu, pela produção de hidrogênio via eletrólise da água e utilização no setor de transportes, seja em células a combustível ou em misturas com combustíveis convencionais em motores a combustão. Para tanto, foi realizado um estudo da utilização do hidrogênio produzido na Itaipu na frota de carros e ônibus para o Brasil, o estado do Paraná, a região oeste do Paraná e a cidade de Foz do Iguaçu. Foram propostos e analisados quatro modelos de produção e abastecimento para o hidrogênio: um utilizando o hidrogênio em células a combustível e outros três misturando-o à gasolina, ao etanol e ao diesel. Como resultado, obteve-se percentuais de capacidade de abastecimento da frota de automóveis, a partir da produção de hidrogênio com a Energia Vertida Turbinável de Itaipu, sendo que a mais vantajosa atualmente é a utilização de hidrogênio misturado à gasolina, pois há um incremento em até 18% na eficiência do motor adicionando-se 5% de hidrogênio.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio, Energia Vertida Turbinável, Itaipu, Célula a Combustível, Motores a Combustão.

1. INTRODUÇÃO

O modelo atual de desenvolvimento caracteriza-se por um elevado consumo energético, sendo que os combustíveis fósseis respondem por cerca de 80% do suprimento global de energia (BP, 2007). No entanto, no Brasil os combustíveis fósseis representaram no ano de 2011, 55,9%; enquanto as energias renováveis como a hidráulica, biomassa da cana, lenha e carvão vegetal, responderam por 44,1% na participação da oferta interna de energia (EPE, 2012). Todavia, a dependência por combustíveis fósseis ainda é predominante no cenário nacional e mundial, o que acarreta importantes repercussões tanto econômicas quanto ambientais.

No âmbito econômico e de segurança energética, a produção de petróleo está centralizada em determinadas regiões do mundo que são influenciadas, especialmente por fatores políticos, o que contribui para preços instáveis e cada vez mais altos (GAMBETTA, 2010). Para muitos especialistas os fatores políticos somados ao fator físico de esgotamento das reservas de petróleo, estimadas em algumas poucas décadas, resultarão em elevações progressivas do preço até atingir níveis que poderão afetar fortemente o desenvolvimento econômico de muitos países (GODOY, 2008).

Do ponto de vista ambiental, a queima intensiva de combustíveis fósseis para gerar energia produz gases e outros poluentes que, ao serem emitidos para a atmosfera, contribuem para a degradação da qualidade do ar, inclusive afetando a saúde da população, e para a intensificação do efeito estufa, apontado como principal responsável pela mudança global do clima (MELLO e HOGAN, 2007).

O relatório *World Energy Outlook 2009* (IEA, 2009) apresenta projeções de um acréscimo de 40% na demanda energética mundial para 2030. De acordo com as estimativas, o ritmo de crescimento da demanda mundial por petróleo será de 1% ao ano, o que significa passar de 852 milhões de barris diários consumidos em 2008 para uma demanda de 105 milhões de barris diários em 2030.

Nesse contexto, Gambetta (2010) mostra que considerando as questões e desafios agregado ao suprimento de petróleo, o hidrogênio apresenta-se como uma alternativa para suprir parte da demanda energética futura, uma vez que pode ser

obtido a partir de uma ampla gama de fontes primárias, incluindo os combustíveis fósseis, a energia nuclear e as fontes renováveis de energia. Isto consequentemente resultará em uma maior invariabilidade na disponibilidade e no custo/preço da energia, acarretando maior segurança energética e menores tensões políticas.

Além disso, como o hidrogênio pode ser produzido a partir de fontes livres de carbono, a utilização deste vetor energético contribuiria com a diminuição das emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa no setor de energia através de sua conversão em eletricidade em células a combustível, as quais apresentam maiores eficiências quando comparadas com os sistemas térmicos convencionais, como motores-geradores e turbinas (SANTOS, 2008).

Entretanto, o hidrogênio molecular não é uma fonte primária de energia e para obtê-lo é necessário extraí-lo de substâncias onde esteja presente, como a água e os compostos orgânicos. Um dos métodos de obtenção do hidrogênio é a eletrólise da água, que consiste na dissociação das moléculas da água em seus elementos constituintes, hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), com a utilização da eletricidade (CEMIG, 2012). Este é um processo considerado interessante, principalmente para os países com grande potencial hídrico, como é o caso do Brasil (GODOY, 2008).

Por meio da eletrólise, pode-se gerar energia em horários de ponta ou servir de combustível para automóveis, tanto utilizando o hidrogênio em células a combustível, como em motores a combustão interna, misturando-o com os combustíveis tradicionais, aumentando assim sua eficiência e economia (GOMES NETO, 2005).

Entre outras aplicações, as portáteis são de grande abrangência, visto que as células a combustível podem substituir pilhas e baterias usadas em equipamentos eletrônicos, como em laptops, telefones celulares, palmtops, entre outros (GOMES NETO, 2005). O hidrogênio pode também servir como insumo na indústria química e até como matéria prima para a produção de fertilizantes, como a amônia (SOUZA, 1998).

Segundo Gomes Neto (2005), diretor da empresa Brasil H2 Fuel Cell Energy, os custos a tecnologia do hidrogênio têm caído 25% nos últimos anos, ademais, levando em consideração os benefícios ambientais e os relacionados à segurança energética, essa tecnologia se tornará economicamente competitiva.

Dentro de uma perspectiva de aproveitamento de fontes renováveis para a geração de energia, este trabalho de conclusão de curso (TCC) pretende contribuir

para a identificação de aproveitamento da parcela de energia que hoje é desperdiçada, como é o caso da energia vertida turbinável (EVT) das usinas hidrelétricas, dimensionando a capacidade de produção da Usina Hidrelétrica de Itaipu, assim como a quantidade de veículos que poderiam ser abastecidos com o hidrogênio lá produzido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HIDROGÊNIO

2.1.1. Propriedades

Nomeado pelo químico francês Lavoisier, o hidrogênio é o elemento químico mais leve, possuindo uma massa atômica de 1,00797 g/mol e densidade de 0,084 kg/m³ a 1 bar e a 25°C (MARQUES *et al*, 2004). É um dos mais abundantes do universo, correspondendo a aproximadamente 75% dos átomos presentes. Entretanto, está principalmente associado a outros elementos na forma de compostos químicos como água e hidrocarboneto, sendo raro encontrá-lo como um gás em seu estado livre, devido ao seu baixo peso (BALL e NIESCHEL, 2009).

Em temperatura e pressão ambiente, o hidrogênio apresenta-se na forma de um gás incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar. Em seu estado líquido, seu volume é 700 vezes menor que no seu estado gasoso, porém precisa ser armazenado sob a temperatura de -253 °C. Outra forma de diminuir seu volume é comprimindo-o quando está na forma de gás (BEZERRA FILHO, 2008).

De acordo com Almeida e Moura (2005), a energia do hidrogênio é 2,4 vezes maior que a do gás natural por unidade de massa, e é 1100 vezes maior que uma bateria ácida. Porém, para sua utilização precisa ser submetido a altas taxas de compressão, devido a sua propriedade de expansão em pressão ambiente.

2.1.2. Produção

De acordo com Silva (1991), existem diversos processos físicos e químicos através dos quais o hidrogênio é resultante. Dentre esses processos, podemos destacar dois grupos: aqueles em que o hidrogênio é o principal produto, ou um dos principais, e aqueles em que ele é apenas um subproduto do processo, podendo ser aproveitado.

A maior parte do hidrogênio produzido hoje é a partir de derivados fósseis como: gás de carvão gaseificado, gás natural e reforma de petróleo. Tendo em vista a importância de se utilizar fontes renováveis para produzir energia, a eletrólise e a gaseificação da biomassa são alternativas já existentes para a obtenção do hidrogênio de uma forma sustentável. Entretanto, somente 5% do montante é produzido atualmente a partir de fontes renováveis (GOMES NETO, 2005).

As fontes de hidrogênio, os processos de obtenção e o tipo de energia utilizada são apresentados na Tabela 1. É importante observar que todos os tipos de energia produzida por todas as fontes existentes podem ser utilizadas para a produção de hidrogênio através da eletrólise.

TABELA 1 – Principais fontes, processos e tipos de energia utilizadas na obtenção do H₂.

Fonte de H₂	Energia	Processo
Água	Eletricidade	Eletrólise, Fotólise, Eletrólise do Vapor, Decomposição Termoquímica ou Processo Fotoeletroquímico.
Gás natural (rico em CH ₄)	Gás natural	Reforma Catalítica ou Craqueamento Térmico
Petróleo	Petróleo	Reforma ou Gaseificação do Petróleo
Carvão	Carvão	Reforma ou Gaseificação do Carvão
Etanol	Etanol	Reforma do Etanol
Metanol	Metanol	Reforma do Metanol
Biomassa	Biomassa	Gaseificação da Biomassa
Biomassa ou Lixo Urbano	Calor, eventualmente	Biológico (Biogás)
Bactérias Fermentativas	Bactérias Fermentativas	Fermentação de Compostos Orgânicos
Bactérias Fotossintetizantes	Energia Solar	Biofotólise
Hidrocarbonetos Pesados	Hidrocarbonetos	Oxidação Parcial

Fonte: PARIZZI, (2008)

A Tabela 2 mostra os principais processos de produção industrial de hidrogênio e a reação do balanço final envolvida em cada processo. Sendo que este trabalho focalizará particularmente o processo de eletrólise da água.

TABELA 2 - Principais processos de produção industrial do H₂ e suas reações globais.

Processo	Reação
Eletrólise da água	$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$
Gaseificação do carvão	$C + 2H_2O \rightarrow 2H_2 + CO_2$
Reforma da nafta	$CH_2 + 2H_2O \rightarrow 3H_2 + CO_2$
Reforma do gás natural	$CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$

Fonte: GOSNELL, (2005)

2.1.3. Eletrólise da Água

A produção de hidrogênio pela eletrólise é uma das mais conhecidas, porém ainda não muito disseminada devido ao custo da eletricidade gasta na geração, visto que apenas 4% do hidrogênio produzido atualmente é por este processo (BALL e NIESCHEL, 2009).

O processo de eletrólise da água consiste na decomposição química da água em seus elementos constituintes, hidrogênio e oxigênio, com a utilização de eletricidade. Quando uma corrente elétrica atravessa a água, a ligação entre os elementos se rompe gerando dois átomos de hidrogênio carregados positivamente, e um átomo de oxigênio carregado negativamente (MARQUES *et al*, 2004). As espécies iônicas H^+ e OH^- presentes na água líquida, aumentadas em quantidade por uma solução de um composto químico, ácido ou base (em geral KOH), movem-se para os eletrodos introduzidos na solução quando estes são polarizados (negativamente o catodo e positivamente o anodo), ocorrendo a transferência de cargas entre os íons e os eletrodos, produzindo-se átomos de hidrogênio no catodo e oxigênio no anodo (SILVA, 1991).

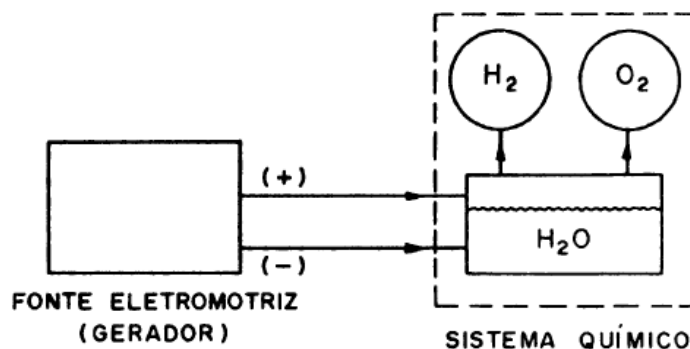


FIGURA 1 – Diagrama do processo de eletrólise da água

Fonte: CHESF, (1987)

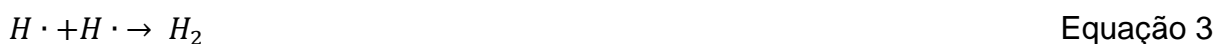
As reações envolvidas no processo de eletrólise estão apresentadas na Equação 1 (MARQUES *et al*, 2004):



Era de se esperar que a água se separasse em partículas neutras (H e OH), porém isso não ocorre devido à eletronegatividade do oxigênio ser maior que a do hidrogênio, assim, o oxigênio capta o elétron do hidrogênio, ficando mais estável com seus orbitais preenchidos. O H^+ captura um elétron do catodo, que é doador de elétrons, ficando assim neutro, de acordo com a Equação 2 (MARQUES *et al*, 2004).



Este átomo de hidrogênio encontra outro e forma uma molécula de gás, conforme a Equação 3 (MARQUES *et al*, 2004).



O íon OH^- migra para o anodo e perde o elétron que havia capturado do hidrogênio. A equação 4 mostra que a produção de água e de oxigênio é conseguida a partir de quatro íons OH^- (MARQUES *et al*, 2004).



Equação 4

A liberação de oxigênio é observada pelas bolhas que surgem na solução. Assim, obtêm-se um circuito fechado, envolvendo elétrons no circuito externo e íons hidróxido na água. Enquanto a energia cedida é armazenada sob a forma de hidrogênio (MARQUES *et al*, 2004).

Segundo Ullmann (1989) e Chesf (1987), a eletrólise da água pode ser considerada um processo reversível. Desta forma o seu balanço energético é dado por:

Energia elétrica fornecida pelo gerador	=	Variação da energia química do sistema
$E \cdot Q$	=	$-\Delta G$

Onde:

E = tensão mínima para a eletrólise

Q = carga transferida à reação

ΔG = variação da energia livre de Gibbs da reação

A partir da termodinâmica tem-se deste processo (SILVA, 1991):

$V1 = -\Delta G / n \cdot F$ Tensão mínima para o desenvolvimento das reações

$V2 = 0 / n \cdot F$ Tensão termoneutra, não há troca de calor entre o sistema químico e o meio ambiente.

Onde:

n = número de elétrons transferidos na reação

F = constante de Faraday (96.489 Coulombs/Equivalente)

ΔH = Variação da entalpia da reação

$V1$ e $V2$ são funções diretas da temperatura em que se desenvolve o processo.

A partir disso, pode-se observar que para tensões abaixo de $V1$ a eletrólise não ocorre, para tensões entre $V1$ e $V2$ a eletrólise ocorre desde que seja fornecido

calor ao processo e observa-se também que para tensões acima de V_2 a eletrólise é obtida com transferência de calor ao ambiente (SILVA, 1991).

Estas observações estão ilustradas na Figura 2.

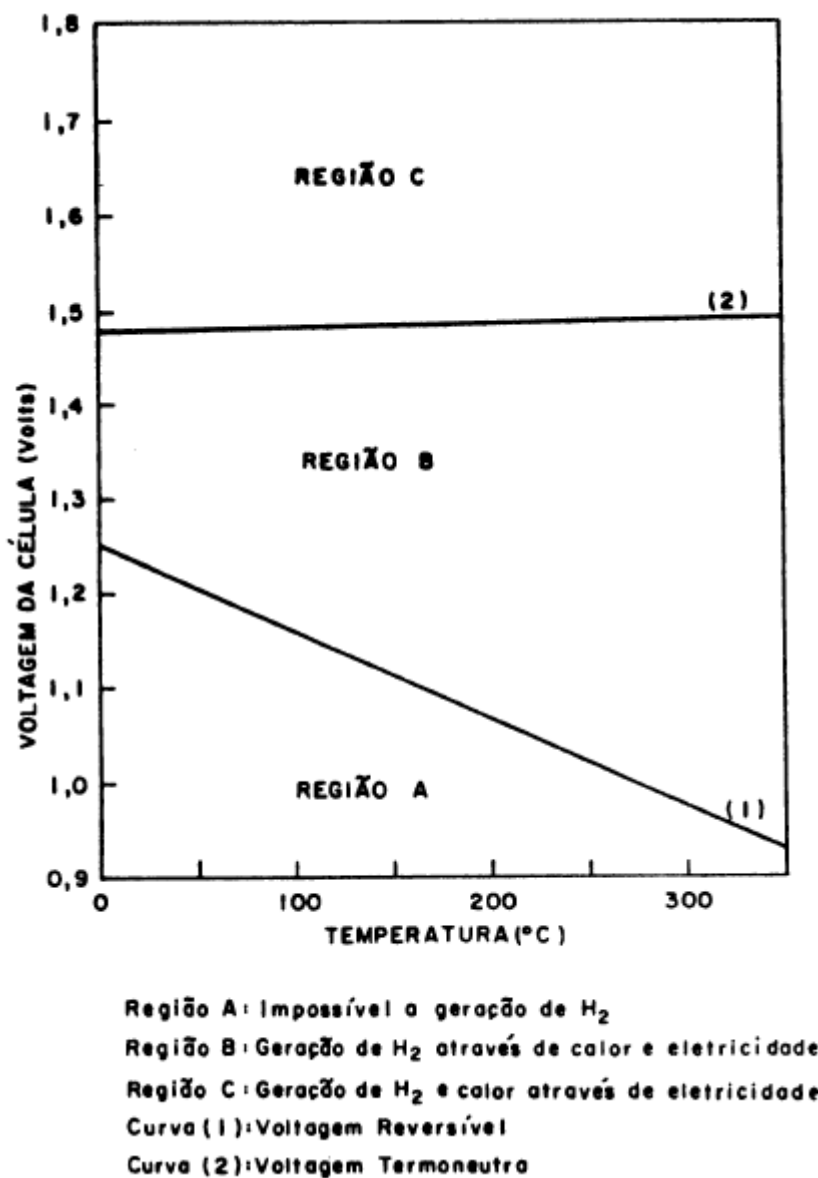


FIGURA 2 - Curvas de tensão versus temperatura para a eletrólise.

Fonte: SILVA, (1991)

A maioria dos eletrolisadores opera na Região C da Figura 2. Termodinamicamente é estabelecido um potencial mínimo para a eletrólise e a diferença entre a tensão de operação da célula eletrolítica e a tensão mínima é conhecida como sobretensão da célula, a qual é provocada pelos seguintes fatores: redução da condutividade do meio condutor iônico em decorrência da concentração

de íons nos eletrodos; formação de nuvens de moléculas em volta dos íons, causando uma menor capacidade de locomoção dos mesmos; taxa de reação lenta nos eletrodos; acúmulo de gases junto aos eletrodos, reduzindo a área disponível da reação, sendo importante que os gases que se formam sejam retirados rapidamente (CHESF, 1987).

Quanto maior for essa diferença, isto é, quanto maior a tensão de operação da célula, menor sua eficiência e maior seu consumo de energia, conforme indicado na Tabela 3 (SOUZA, 1998).

TABELA 3 - Variação da eficiência com a tensão de operação e consumo de energia

Eficiência (%)	Tensão de operação (V)	Consumo de energia (kWh/Nm³)
100	1,481	3,544
96	1,543	3,692
92	1,610	3,852
88	1,683	4,027
84	1,763	4,219
80	1,839	4,400
78	1,899	4,544
76	1,949	4,663
74	2,001	4,789
72	2,057	4,922
70	2,116	5,063

Fonte: SOUZA, (1998)

Considerando-se os fatores de sobretensão observa-se, segundo Silva (1991), a seguinte expressão para a tensão de eletrólise:

$$V = E + nc + na + I.R_0$$

Equação 5

Onde:

V = tensão operacional

E = tensão mínima teórica (termodinâmica)

n_c = sobretensão no catodo

n_a = sobretensão no anodo

I = corrente na célula

R_0 = resistência da célula (Ω)

O termo $I \cdot R_0$ depende da condutividade do meio condutor iônico, da distância entre os eletrodos, da condutividade do diafragma e dos eletrodos, e da resistência de contato entre os componentes da célula eletrolítica (SILVA, 1991).

Silva (1991) ressalta que o aumento da temperatura de operação da célula diminui a sobretensão, porém causa o aumento da corrosão dos componentes (diminuição da resistência química e mecânica dos materiais da célula) e torna necessário pressurizar a célula para evitar perda de água e de eletrólito por evaporação. Com o aumento da pressurização das células há um acréscimo no gasto de energia, mas em compensação ocorre um incremento na eficiência, devido à redução do tamanho das bolhas de gás que se formam nos eletrodos.

Segundo Mokwa, *et al* (2007), a produção comercial do hidrogênio por este processo tem uma eficiência entre 70% e 75% que pode ser melhorada pela adição de sais ao eletrólito para aumentar a condutividade, bem como utilizar a eletrólise do vapor substituindo parcialmente a eletricidade por energia térmica.

O seu custo também é alto, sendo a eletricidade responsável por dois terços deste custo, como mostra a Figura 3. Por isso, a produção do hidrogênio por este processo ainda não é economicamente favorável, porém, com o avanço da tecnologia de células a combustível, este processo está se tornando cada vez mais eficiente e os custos cada vez menores (GOMES NETO, 2005).

A partir dos dados anteriores, chega-se à conclusão de que a viabilidade da eletrólise depende principalmente da forma de produção da energia elétrica utilizada. Tendo em vista que a energia elétrica produzida nas hidrelétricas é de longe a maior fonte de energia renovável, representando em torno de 92% da energia renovável produzida no Brasil e têm grande potencial na produção de hidrogênio através da eletrólise da água. Considerando o potencial hidrelétrico brasileiro e a possibilidade de excessos de reserva hídrica nos períodos de chuva, o Brasil poderá se tornar um grande produtor de hidrogênio (ESPÍNOLA, 2008).

Segundo Hoffmann (2001) e Silva (1991), os principais componentes de um sistema de eletrólise típicos são o eletrolisador, a unidade de potência, o separador de gases, a unidade de purificação e as unidades de armazenamento.

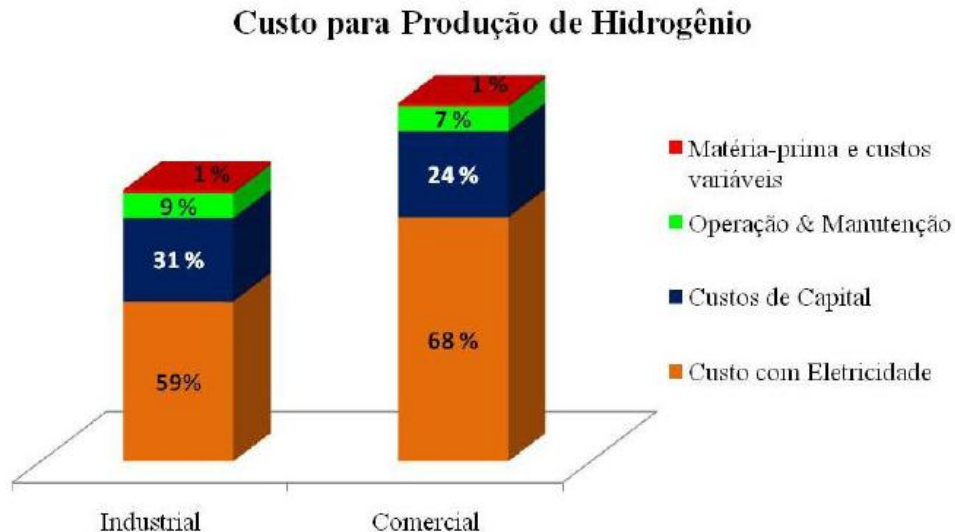


FIGURA 3 – Custo para produção de H_2 através da eletrólise da água

Fonte: CARNIELETTO, (2011)

2.1.4 Eletrolisadores

O eletrolisador é o dispositivo onde ocorre a reação eletroquímica de decomposição da água, onde se produz o hidrogênio e o oxigênio. Eles podem ser divididos em dois tipos: os eletrolisadores alcalinos e os eletrolisadores do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) (GAMBETTA. 2010)

Os eletrolisadores alcalinos, também conhecido como eletrolisadores convencionais, são assim chamados devido ao tipo de eletrólito utilizado, uma solução alcalina, geralmente de hidróxido de potássio (KOH), considerando que a água é um condutor iônico muito pobre, em uma concentração entre 25-30% em massa (IVY, 2004). Os eletrodos normalmente utilizados são feitos de níquel, ou aço niquelado, com uma cobertura catalítica, geralmente um metal nobre como a platina, ródio, irídio, entre outros. Podem ser do tipo unipolar (também conhecido como tipo

tanque) ou bipolar (filtro prensa). Essa diferença refere-se à disposição dos eletrodos (GAMBETTA, 2010).

O termo unipolar significa que os eletrodos têm uma única polaridade (negativa ou positiva) de forma que em cada um deles se processa apenas uma reação produzindo somente um gás (H_2 ou O_2 em ambos os lados do eletrodo); são agrupados em um único reservatório de eletrólito (tanque), e arranjados eletricamente em paralelo, separados por diafragmas de asbesto. Usa-se nos eletrodos unipolares elevadas correntes e baixas voltagens (STUART, 1991, SILVA, 1991 e LEROY, 1983).

Nos eletrolisadores bipolares todos os eletrodos, exceto os que se localizam nas extremidades, possuem duas polaridades, funcionando como anodo (produção de O_2) em uma das faces e como catodo (produção de H_2) na outra face. O arranjo desses eletrodos é por meio de placas paralelas na posição vertical, onde um grande número pode ser colocado lado a lado, com um diafragma separando a câmara de produção de hidrogênio da de oxigênio; cada eletrodo está eletricamente em série, mas isolados de seus vizinhos. Neste tipo de eletrolisador há baixas correntes em relação ao unipolar, e utiliza altas voltagens (STUART, 1991, SILVA, 1991 e LEROY, 1983). As Figuras 4 e 5 mostram o esquema do arranjo unipolar e o bipolar.

Souza (1998) mostra que o arranjo unipolar possui uma montagem eletromecânica simples e de fácil manutenção, pois módulos de células individuais podem ser isolados sem interromper a operação. Devido a característica de utilizar altas corrente e baixas voltagens, exigem equipamentos como retificadores e barras condutoras de custos mais elevados; porém apresentam menor custo de manutenção devido à simplicidade. Já os eletrolisadores bipolares, apesar de mais complexos, dispensam o uso de barramentos para interligação dos eletrodos porque o eletrólito é o meio condutor entre as células, sendo que, também devido à baixa corrente, há uma menor resistência interna.

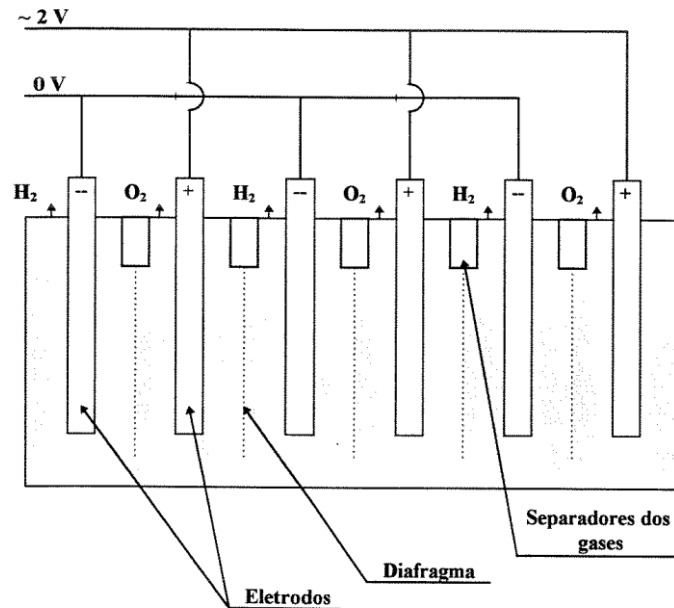


FIGURA 4 – Esquema de um eletrolisador unipolar (tipo tanque)

Fonte: BOCKRIS, (1981)

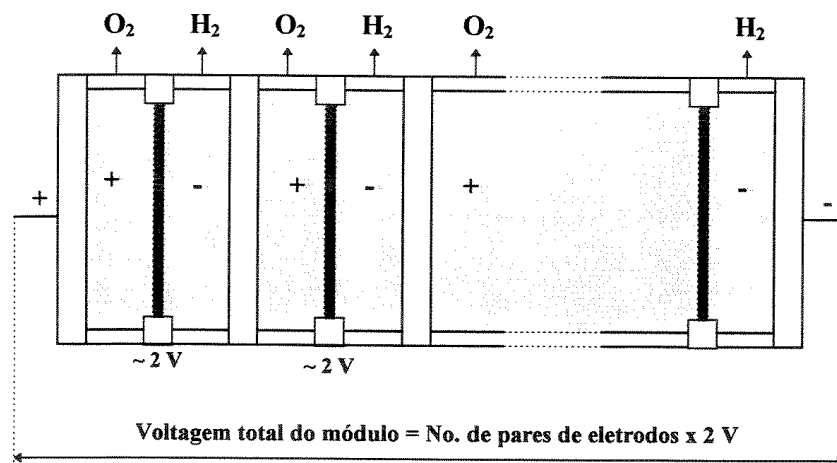


FIGURA 5 – Esquema de um eletrolisador bipolar (filtro prensa)

Fonte: BOCKRIS, (1981)

Segundo Silva (1991) arranjos unipolares são utilizados em unidades de produção de até $100\text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio. No entanto, atualmente, os fabricantes apresentam, em sua relação de produtos, apenas eletrolisadores bipolares, por serem mais compactos. Conforme MME (2005), os eletrolisadores avançados do tipo bipolar apresentam maiores capacidades de produção de hidrogênio por unidade de área de eletrodo, por conta da sua elevada densidade de corrente. O fato de ser compacto proporciona alta eficiência e menores custos de materiais de construção e equipamentos auxiliares. Com a tecnologia atual referente à construção e materiais,

esses eletrolisadores podem operar a temperaturas entre 60 °C e 100 °C e pressões entre 1 bar e 30 bar. A eficiência global, aproveitando-se o calor gerado, gira em torno de 75% a 90% (NMSE, 2004).

Há diversos fatores que determinam o volume de hidrogênio e oxigênio produzidos pelo eletrolisador. As considerações mais importantes são: a concentração de KOH na solução eletrolítica; a área de superfície dos eletrodos; a distância física entre os eletrodos; a intensidade de corrente aplicada; entre outros (MOKWA *et al*, 2007).

No âmbito dos eletrolisadores do tipo PEM, estes foram desenvolvidos entre as décadas de 1970 e 1980, ou seja, são relativamente novos comparados aos alcalinos (SOUZA, 1998; ZOULIAS *et al*, 2004). A principal característica do eletrolisador PEM é ter um eletrólito sólido, uma membrana polimérica capaz de transportar prótons e normalmente a membrana utilizada é o Nafion (um polímero sulfonado similar ao politetrafluoreto, Teflon), fabricado pela DuPont. A membrana tem somente 0,25 mm de espessura e serve também como uma membrana separadora entre os gases evoluídos, permitindo maior proximidade entre os eletrodos (PERLES, 2008). O material utilizado nos eletrodos basicamente é grafite com cobertura de platina e em projetos mais recentes também aparecem misturas de óxidos como eletrocatalisadores (LYMBEROPOULOS, 2005).

Os tipos de eletrodos utilizados neste eletrolisador podem ser baseados em grafite ou em uma mistura grafite-titânio com sistema catalítico de platina associada a rutênio e óxido de irídio. A água utilizada na eletrólise deve ser deionizada para evitar a contaminação da membrana (NEVES JÚNIOR, 2001).

Segundo Norbeck (2003), a temperatura de operação deste tipo de eletrolisador está entre 80 °C a 100 °C, para pressões entre 1 bar a 70 bar e o consumo médio de energia elétrica em torno de 6 kWh/m³ de hidrogênio produzido. A eficiência global, incluindo o aproveitamento do calor produzido, situa-se em torno de 80% a 90% e sua vida útil é de aproximadamente 17 anos. A Figura 6 apresenta uma representação esquemática do eletrolisador PEM.

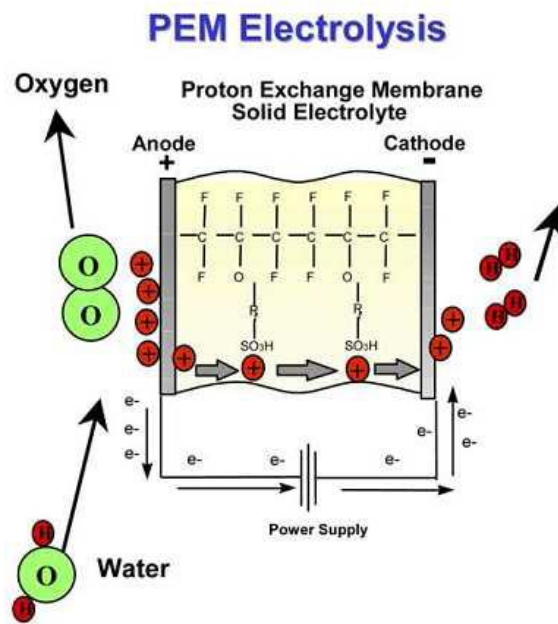


FIGURA 6 - Representação esquemática do eletrolisador PEM

Fonte: Barbir, (2005).

Ambos os tipos de eletrolisadores devem receber um fluxo contínuo de água. O requerimento de qualidade da água difere entre equipamentos, dependendo do fabricante, porém, precisa ser de uma pureza elevada. Algumas unidades incluem o sistema de purificação da água dentro de sua unidade de geração de hidrogênio, enquanto outros exigem um deionizador externo, ou unidade de osmose reversa antes da água alimentar o dispositivo (BARBIR, 2005).

Além dos eletrolisadores de KOH e PEM, pesquisas estão sendo feitas no sistema à base de óxido fundido, o qual promete bons resultados de eficiência, dependendo ainda do desenvolvimento de tecnologias de novos materiais cerâmicos (IVY, 2004).

2.1.5. Armazenamento

O maior desafio no projeto de tanques de hidrogênio é o de se poder armazenar a maior quantidade de hidrogênio possível em um tanque de combustível que ocupe o menor espaço, peso e custo.

Ainda hoje, se tem a visão de que o hidrogênio é perigoso. De fato, características como sua elevada capacidade de dispersão no ar, devido a sua baixa densidade e a facilidade de combustão comparada aos combustíveis convencionais são o suficiente para tornar seu manuseio e armazenamento importantes. Entretanto, as tecnologias existentes para outros gases e as que estão se desenvolvendo já o tornam uma fonte segura de energia desde que as normas sejam seguidas (CARNIELETTO, 2011). Na figura 7 é mostrado uma estação de armazenamento de hidrogênio.



FIGURA 7 - Estação de armazenamento de hidrogênio em Hamburg

Fonte: NORBECK, (2003)

Segundo Norbeck (2003) e Bezerra Filho (2008) o hidrogênio pode ser armazenado de várias maneiras, onde as principais são em estado gasoso (GH_2), comprimido em cilindros a temperatura ambiente e no estado líquido (LH_2), em tanques criogênicos, que não trocam temperatura com o meio externo

O armazenamento como gás comprimido é atualmente a forma mais simples de armazenar o hidrogênio. Os equipamentos necessários são o compressor e um vaso de pressão, porém a maior deficiência dessa forma de armazenamento é sua baixa densidade de armazenamento, que depende da pressão. Quanto maior a pressão de armazenamento, mais elevados os investimentos de capital, principalmente devido aos compressores, e maiores são os custos operacionais

(GODOY, 2008). A Tabela 4 apresenta a densidade de energia do hidrogênio comparada a de outros portadores de energia.

TABELA 4 - Densidade de energia do hidrogênio *versus* a de outros portadores de energia.

Portador de energia	Forma de armazenamento	Densidade de energia por massa (kWk/kg)	Densidade de energia por volume (kWh/l)
Hidrogênio	Gás (200 atm)	33,3	0,53
	Gás (300 atm)	33,3	0,75
	Gás (800 atm)	33,3	2,92
	Líquido (-253 °C)	33,3	2,36
	Hidretos metálicos	0,58	3,18
Gás natural	Gás (200 atm)	13,9	2,58
	Gás (300 atm)	13,9	3,38
	Líquido (-162 °C)	13,9	5,8
GPL	Líquido	12,9	7,5
Metanol	Líquido	5,6	4,42
Gasolina	Líquido	12,7	8,76
Gasóleo	Líquido	11,6	9,7
Eletricidade	Bateria ácido-chumbo	0,05	0,1
	Bateria íons de lítio	0,25	0,05

Fonte: GOMES NETO, (2005)

O hidrogênio comprimido é armazenado em tanques de alta pressão. Este processo exige energia para ser realizado e o volume que o gás compactado ocupa é normalmente bastante grande, com uma densidade de energia por volume mais baixa quando comparado a um tanque de gasolina tradicional. Em nível de comparação, um tanque de gás de hidrogênio que contém uma quantidade de energia equivalente a um tanque de gasolina, é mais de 3000 vezes maior que o tanque de gasolina (SANTOS JR, 2004).

Segundo Almeida e Moura (2005), a compressão de um gás requer energia, que depende do processo termodinâmico utilizado. A Figura 8 mostra que a energia necessária para o processo adiabático é claramente superior à do processo isotérmico. No processo de compressão de hidrogênio a energia necessária é também muito superior à energia necessária para a compressão de metano, o qual requer cerca de 20% da energia do hidrogênio para ser comprimido até 800 bar.

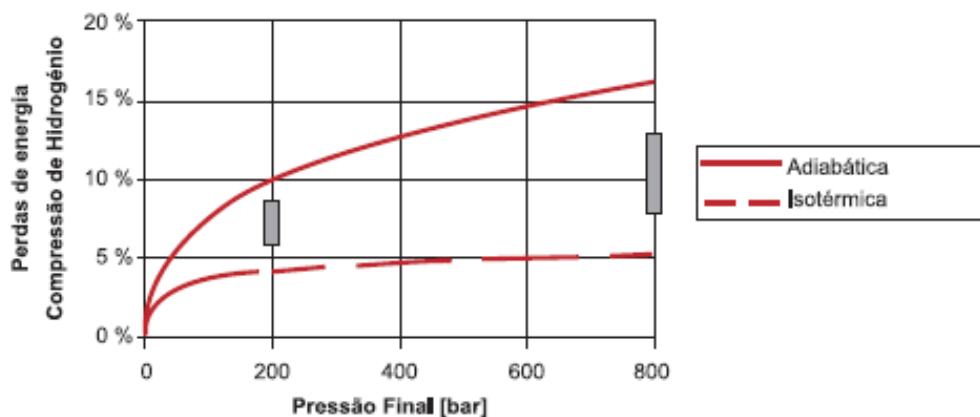


FIGURA 8 – Perdas de energia na compressão do hidrogênio.

Fonte: SORENSEN, (2005)

A outra maneira de se armazenar o hidrogênio é liquefazendo-o. É possível obter hidrogênio no estado líquido a temperaturas extremamente baixas. O hidrogênio líquido tem que ser armazenado a 20 K ou -253 °C. O processo requer energia, resultando em um custo de aproximadamente 30% da energia total que o hidrogênio poderia armazenar. Os tanques ou cilindros de armazenamento são isolados termicamente para preservar a temperatura e são reforçados para armazenar o hidrogênio líquido em baixa de pressão (MOKWA *et al*, 2007).

Ainda mais energia é necessária para compactar o hidrogênio por liquefação, que consome 35 a 60 MJ/kg, ou seja, a 30 a 50% da energia total contida no hidrogênio, como se pode observar na Figura 9. (ALMEIDA e MOURA, 2005).

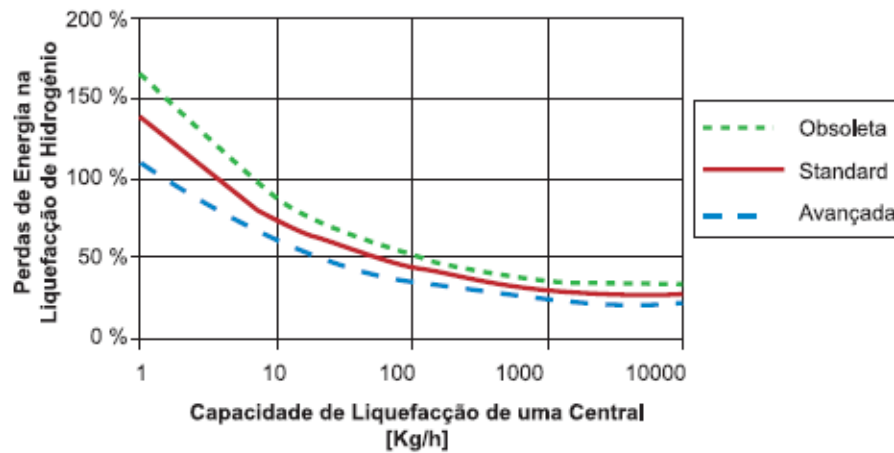


FIGURA 9 - Perdas de energia na liquefação de hidrogênio

Fonte: SORENSEN, (2005)

Bezerra Filho (2008) aponta que o hidrogênio líquido ocupa 700 vezes menos espaço no estado líquido do que em seu estado gasoso, em temperatura ambiente. Para utilizá-lo posteriormente em sua forma gasosa, ele deve ser pressurizado através de uma bomba criogênica. Sendo que se gasta mais energia para armazenar o hidrogênio líquido do que para armazená-lo em estado gasoso. Porém, um tanque de LH_2 equivale energeticamente a 10 tanques de GH_2 já pressurizado. Sendo assim, no caso de grandes distâncias a serem percorridas por caminhões tanque, entre a central de produção e o consumo final, será mais viável armazenar o hidrogênio em seu estado líquido (MARQUES *et al*, 2004).

2.2. HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL

2.2.1. Células a combustível

A primeira célula a combustível (CaC) surgiu em 1839, desenvolvida pelo físico inglês William Grove. Pela passagem de corrente elétrica através da água,

podiam-se obter os gases hidrogênio e oxigênio, fenômeno que levou Grove a deduzir que o processo reverso poderia gerar água e energia elétrica. O resultado de sua dedução pôde ser comprovado pela bateria a gás, nome dado a sua invenção, sem muita aplicação prática naquela época. Em 1889 os cientistas Ludwig Mond e Charles Langer nomearam o invento de Grove de célula a combustível (HOOGERS, 2003).

A partir de 1959 o inglês Francis Thomas Bacon apresentou um sistema de célula a combustível de 5 kW para uma máquina de solda. No entanto, as aplicações de maior importância das células a combustível iniciaram-se nos projetos Gemini e Apollo (Figura 10) da Agência Espacial dos Estados Unidos, a NASA. Era necessário um equipamento para a produção de energia com eficiência e que utilizasse um combustível leve e com grande densidade de energia. Então, foi escolhido o hidrogênio (BASU, 2007).

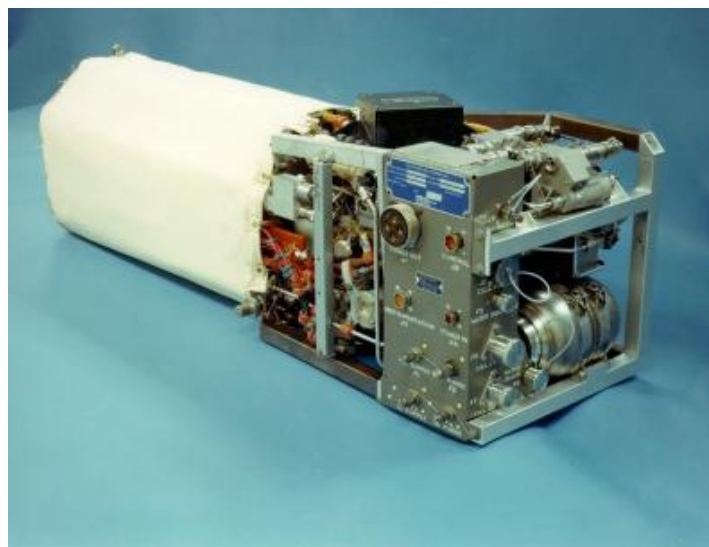


FIGURA 10 - Célula a Combustível utilizada no programa Apollo da NASA.

Fonte: COOK, (2001)

A princípio, uma célula combustível opera como uma bateria só que em vez de armazenar energia química para convertê-la em eletricidade até se esgotar, ela converte a energia química da reação entre o hidrogênio e o oxigênio para formar água, em eletricidade e calor enquanto for fornecido combustível (RIFKIN, 2003).

As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente, sem combustão, a energia química contida num combustível rico em

hidrogênio em eletricidade e energia térmica, sendo vista como uma das tecnologias de produção de energia elétrica mais promissoras (ALMEIDA e MOURA, 2005).

A Figura 11 apresenta os componentes básicos de uma célula a combustível, os quais incluem um eletrodo positivo (ânodo), um eletrodo negativo (cátodo) e um eletrólito.

O hidrogênio é fornecido ao ânodo, enquanto o oxigênio é fornecido ao cátodo. O combustível é oxidado eletroquimicamente na superfície do ânodo, Pela ação de um catalisador, o átomo de hidrogênio se divide em um próton e um elétron, que tomam diferentes caminhos em direção ao cátodo. O eletrólito permite a passagem dos íons do ânodo para o cátodo, porém bloqueia a passagem dos elétrons, os quais são forçados a seguirem pelo circuito elétrico exterior à célula. Os íons de hidrogênio, quando chegam ao cátodo, combinam-se simultaneamente com os elétrons que retornam do circuito elétrico e com os átomos de oxigênio fornecidos ao cátodo, formando água (HEISSEMBERGER, 2001; ALMEIDA e MOURA, 2005; GOMES NETO, 2005).

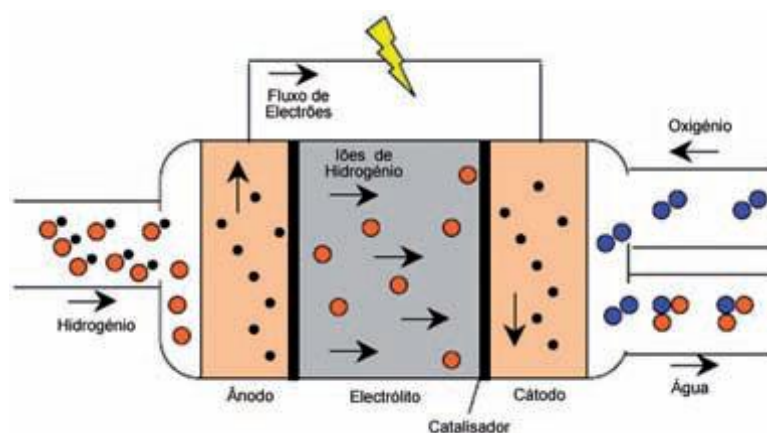


FIGURA 11 - Representação de uma célula a combustível.

Fonte: ALMEIDA e MOURA, (2005)

Hoje, no mercado existem diversos tipos de células a combustível disponíveis para cada tipo de aplicação, seja ela industrial, residencial, veicular e em baterias de celulares e computadores (FRANCHI, 2009).

Sua classificação é feita de acordo com o ponto de temperatura de operação da célula, essa temperatura está ligada diretamente ao eletrólito utilizado para reagir o hidrogênio e o oxigênio. Uma vez que para cada tipo de aplicação há um determinado eletrólito a ser usado.

De acordo com Hoogers (2003), Marques *et al* (2004), Gomes Neto (2005) e Cook (2001), a classificação das células é feita através dos nomes: AFC, PEMFC, PAFC, MCFC e SOFC, que significam em português “célula a combustível alcalina”, “célula a combustível de membrana de troca de prótons”, “célula a combustível de ácido fosfórico”, “célula a combustível de carbonato fundido” e “célula a combustível de óxido sólido”. Estas são as tecnologias principais no que diz respeito à CaC, entretanto, outras vêm sendo inseridas no mercado atual. Neste trabalho será dada ênfase a do tipo PEM, visto que é uma das tecnologias de CaC mais pesquisadas e em desenvolvimento em todo o mundo e a preferida para uso em automóveis.

As características e as principais vantagens e desvantagens das principais das diferentes tecnologias de CaC estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

TABELA 5 - Características das Células a Combustível

Célula a Combustível	Eletrólito	Temperatura de Operação (°C)	Eficiência Elétrica	Densidade de Potência
Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)	Polímero: Nafion® (H_3O^+)	80 - 90	35 – 55%	3,8 – 13,5 kW/m ³
Alcalina (AFC)	KOH (OH^-)	60 – 90	45 – 65%	0,7 – 8,1 kW/m ³
Ácido Fosfórico (PAFC)	H_3PO_3 (H_3O^+)	160 - 200	40 – 50%	0,8 - 1,9 kW/m ³
Óxido Sólido (SOFC)	ZrO_2 (O^{2-})	800 – 900	50 – 65%	1,5 – 5 kW/m ³
Carbonato Fundido (MCFC)	Carbonatos Fundidos (CO_3^{2-})	650 – 700	50 – 65%	1 – 6 kW/m ³

Fonte: Adaptado de GOMES NETO, (2005)

TABELA 6 – Vantagens e desvantagens das Células a Combustível

Célula a Combustível	Vantagens	Desvantagens
PEMFC	Alta densidade de potência Operação flexível Arranque rápido Altas densidades de potência e eficiência.	Custo da membrana e do catalisador. Contaminação do catalisados com CO
AFC	Alta eficiência	Sensível a CO_2 Gases ultra puros, sem reforma do combustível.
PAFC	Maior desenvolvimento tecnológico.	Controle de porosidade do eletrodo Eficiência limitada pela corrosão Sensibilidade a CO
SOFC	Alta eficiência (cinética favorável) A reforma do combustível pode ser feita na célula	Problemas de materiais Expansão térmica Necessidade de pré-reforma.
MCFC	Tolerância a CO/CO_2 Eletrodos a base de Ni	Problema de matérias Necessidade da reciclagem de CO_2 Interface trifásica de difícil controle.

Fonte: Adaptado de GOMES NETO, (2005).

2.2.1.1. PEMFC – Membrana de Troca de Prótons

Foi esta a tecnologia utilizada pela primeira vez na NASA nos anos 60, no programa Gemini. A principal vantagem das células a combustível com membrana de troca de prótons é a sua simplicidade de funcionamento. Baseia-se no uso de uma membrana sólida, feita de um polímero permeável aos prótons quando saturado com água, mas que nestas condições não conduz elétrons. A principal função da membrana é prover uma barreira condutora iônica ao gás, sendo ela uma excelente condutora de prótons (COOK, 2001).

No início do seu desenvolvimento, ácidos fortes, como o ácido sulfúrico concentrado, foram utilizados para fornecer um contato entre a membrana e as superfícies do catalisador. Durante os testes concluiu-se que não era necessária a adição de ácido, bastando apenas manter a membrana hidratada. Os materiais mais utilizados que compõe o polímero são as membranas perfluoradas ou as membranas com base em hidrogênio e carbono. A primeira é normalmente constituída de um ácido denominado de ácido poliperfluorsulfônico e a segunda é constituída de um polímero de polibenzilimida (SPIEGEL, 2008).

Segundo Chia (2006), o combustível destas células é o hidrogênio e o transportador da carga é o íon de hidrogênio, o próton. No ânodo, a molécula de hidrogênio é dividida em íons de hidrogênio e elétrons. Os íons atravessam o eletrólito até ao cátodo enquanto os elétrons passam pelo circuito externo ao qual fornecem energia elétrica. O oxigênio do ar é fornecido ao cátodo e combina-se com os elétrons e com os íons de hidrogênio para formar água. As Equações 6, 7 e 8 representam as reações que ocorrem no ânodo, no cátodo e a reação global, respectivamente, para esta tecnologia.



A estrutura básica de uma CaC tipo PEM é mostrada na Figura 12, composta por dois eletrodos (catodo e anodo), separados por uma membrana sólida que atua como eletrólito (BERNARDE JR, 2009) .

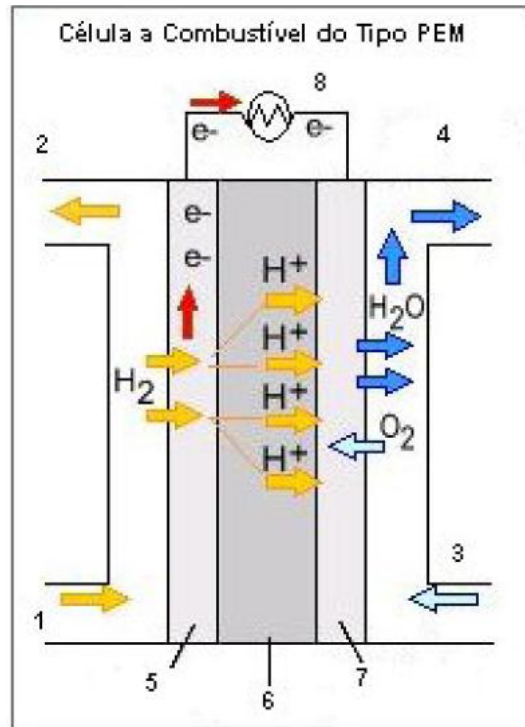


FIGURA 12 – Diagrama esquemático de uma Célula a Combustível tipo PEM.

Fonte: BERNARDE JR, (2009)

Na Figura 12, têm-se que:

- 1 - Entrada de combustível (hidrogênio)
- 2 - Saída de excesso de combustível
- 3 - Entradas de ar
- 4 - Saída de água e calor
- 5 - Anodo
- 6 - Eletrólito
- 7 - Catodo
- 8 - Corrente elétrica.

De acordo com Lopes (2004), fazendo um comparativo às demais tecnologias, as CaC de membrana de troca de prótons fornecem maior potência por volume/massa de célula. A elevada densidade de potência faz com que estas células sejam mais compactas e leves. Além disso, a temperatura de operação é inferior a 100 °C, o que proporciona uma resposta rápida durante a entrada do dispositivo em operação. Estas características, aliadas à possibilidade de variar rapidamente a potência de saída, fazem da célula a combustível de membrana de

troca de prótons a principal candidata às aplicações em automóveis. Os únicos pontos críticos verificados estão relacionados ao controle de água na membrana para o seu bom desempenho e a utilização de platina como catalisador, visto que este é um metal caro (LANZ, 2001).

As vantagens se resumem, então, em uma boa eficiência, em torno de 55%, alta densidade de potência, pouco peso e pequeno volume, tem o menor custo em relação às demais tecnologias, a membrana é imóvel o que simplifica a selagem no processo de produção e reduz a corrosão aumentando a vida útil, possibilita maior robustez em função do eletrólito sólido e possui a capacidade de seguir as variações de carga (GOMES NETO, 2005; LOPES, 2004; HURLEY, 2004, LANZ, 2001).

2.2.2. Motores de combustão interna

Historicamente, a primeira tentativa de desenvolvimento de um motor de hidrogênio foi relatada por W. Cecil em 1820. O motor em si operado no princípio do vácuo, em que a pressão atmosférica impulsiona um pistão de volta contra o vácuo para produzir poder. O vácuo era criado pela queima de uma mistura de hidrogênio-ar, permitindo-lhe expandir-se e deixa-se arrefecer. Embora o motor funcionasse satisfatoriamente, os motores de vácuo nunca se tornaram uma realidade (NORTH, 1992).

Segundo Ganesh *et al* (2007), sessenta anos mais tarde, durante seu trabalho com motores de combustão na década de 1860 e 1870, N. A. Otto (o inventor do ciclo Otto) teria usado um gás produzido sinteticamente para uso como combustível, o que provavelmente apresentava um teor de hidrogênio de mais de 50%. Otto também experimentou gasolina, mas achou perigoso para se trabalhar, voltando assim a usar combustíveis gasosos. Contudo, com o desenvolvimento do carburador, iniciou-se uma nova era em que a gasolina pôde ser usada tanto de forma prática e segura, e o interesse em outros combustíveis decaiu.

As propriedades do hidrogênio que o tornam favorável ao uso como combustíveis são: sua baixa energia de ignição; alta temperatura de auto-ignição; alta velocidade de chama em proporções estequiométricas; alta difusividade e densidade muito baixa (LANZ *et al*, 2001).

Segundo Lanz *et al* (2001), o hidrogênio tem uma ampla inflamabilidade em comparação com todos os outros combustíveis. Como resultado, ele pode ser queimado no motor de combustão interna ao longo de uma ampla gama de misturas de combustível-ar. A grande vantagem disso é que o hidrogênio pode ser utilizado em uma mistura pobre, que é aquela em que a quantidade de combustível é menor do que a quantidade teórica, estequiometricamente ideal para a combustão com uma dada quantidade de ar.

Quando se trata da difusividade do H_2 , falamos da sua facilidade em se dispersar no ar, o que é vantajoso por duas razões principais: por um lado, facilita a formação de uma mistura uniforme de ar e combustível; em segundo lugar, se houver um vazamento de hidrogênio, ele se dispersará rapidamente. Assim, as condições inseguras podem ser evitadas ou minimizadas (NORTH, 1992).

Entretanto, uma propriedade que causa problemas na combustão interna do hidrogênio é sua baixa densidade. Isto resulta em dois problemas principais. Primeiramente, um volume muito grande é necessário para armazenar hidrogênio suficiente para dar a um veículo uma boa autonomia. Em segundo lugar, a baixa densidade energética de uma mistura de hidrogênio-ar diminui consideravelmente a potência de saída do motor (LANZ *et al*, 2001).

Na Tabela 7 são comparadas as propriedades fundamentais relevantes do hidrogênio e da gasolina referente à combustão interna. Com um índice de octano elevado, o hidrogênio permite taxas de compressão altas. No entanto, o baixo consumo de energia mínima de ignição o leva a dificuldades na prevenção da pré-ignição, o que limita a potência e torque (GNÖRICH, 2008).

Gnörich (2008) aponta que na conversão de um motor do Ciclo Otto para operar com hidrogênio, algumas medidas são necessárias para reduzir o problema da pré-ignição, tais como: melhor refrigeração da câmara de combustão, comando de válvulas para redução de resíduos presos, melhor controle de óleo (para reduzir os depósitos e outras fontes de ignição), temperatura do combustível baixa para injeção (disponível com armazenamento de hidrogênio líquido).

TABELA 7 - Propriedades do hidrogênio combustível em comparação com a gasolina

	Unidade	Gasolina	Hidrogênio
Poder calorífico inferior	MJ/kg	44,4	120
Índice de octanos	RON	95	130
Energia mínima de ignição	MJ	0,25	0,02
Temperatura da chama adiabática	K	2270	2384
Velocidade da chama laminar	m/s	0.3	1,9
Relação ar/combustível (estequiométrico)	----	14,5	34,3
Limites de inflamabilidade (relação ar/combustível)	----	25 - 4	345 - 5

Fonte: GNÖRICH, (2008).

De acordo com Ganesh *et al* (2007), outra característica importante quando se fala de combustão do hidrogênio é sua baixa energia de ignição. Ou seja, a quantidade de energia necessária para que o hidrogênio entre em combustão é muito menor do que a necessária para a gasolina, por exemplo. Isso permite que motores com hidrogênio adicionado sejam capazes de inflamar misturas pobres e mesmo assim garantir uma rápida ignição.

Infelizmente, isso também pode ser um problema, uma vez que a baixa energia de ignição pode servir como fontes de inflamação quando há pontos quentes no cilindro ou aquecimento de gases. Prevenir esse problema é um dos desafios associados com o funcionamento de um motor a hidrogênio (KAMIL *et al*, 2011). A elevada temperatura de auto-ignição do hidrogênio (560°C) possui implicações importantes quando se comprime a mistura hidrogênio-ar. A temperatura de auto-ignição é um fator importante na determinação da taxa de compressão que pode ser usada no motor, uma vez que a temperatura final não pode exceder a temperatura de auto-ignição do hidrogênio sem provocar ignição prematura, que é quando a mistura de combustível na câmara a combustão inflama antes da ignição pela vela. A elevada temperatura de auto-ignição de hidrogênio permite que maiores taxas de

compressão podem ser usadas num motor de hidrogênio (KAMIL *et al*, 2011; LANZ *et al*, 2001).

Esta maior taxa de compressão está relacionada com a eficiência térmica do sistema. Uma vez que a eficiência térmica teórica do motor do ciclo Otto baseia-se na taxa de compressão do motor e na taxa de calor específico do combustível, como mostrado na Equação 9 (LANZ *et al*, 2001).

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{V_1/V_2^{\gamma-1}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

V_1/V_2 = taxa de compressão

γ = taxa de calor específico

η_{th} = eficiência térmica teórica

Segundo a Equação, pode-se concluir que quanto maior for a taxa de compressão e/ou a taxa do calor específico, maior será a eficiência térmica do motor. A taxa de calor específico está relacionada com a estrutura molecular do combustível. Quanto menor a complexidade da estrutura molecular do combustível, maior será a taxa de calor específico. O hidrogênio ($\gamma = 1,4$) possui uma estrutura molecular muito mais simples do que a gasolina ($\gamma = 1,1$) (LANZ *et al*, 2001).

A Figura 13 mostra que a eficiência térmica aumenta com a adição de hidrogênio às misturas gasolina e ar. Em comparação com o motor a gasolina, a eficiência é aumentada em cerca de 4%, 18% e 14%, para 2,14%, 5,28% e 7,74% de hidrogênio adicionado, respectivamente. A melhoria no desempenho do motor é devido à ampla inflamabilidade e a maior velocidade de queima do hidrogênio que resultam em uma combustão mais completa e rápida, especialmente sob condições de mistura pobre (CEVIZ *et al*, 2012).

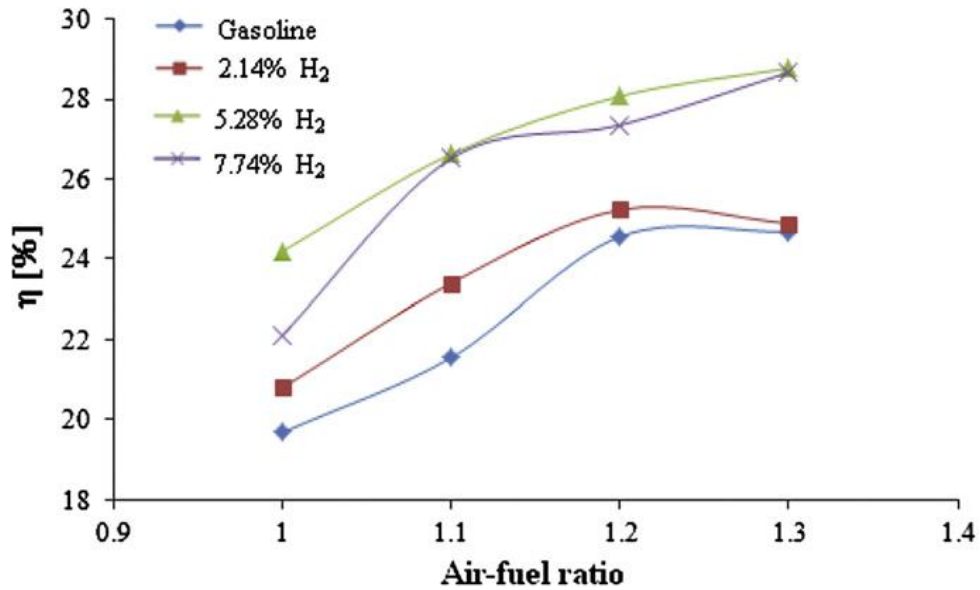


FIGURA 13 - Variação da eficiência térmica do motor a gasolina para diferentes percentuais de hidrogênio.

Fonte: CEVIZ *et al* (2012)

Como referido anteriormente, o hidrogênio possui uma densidade extremamente baixa, o que provoca uma redução na potência de saída. Como consequência, um aumento na quantidade de hidrogênio na ingestão faz deslocar mais ar no coletor de admissão e do cilindro do motor. Nota-se também que há uma redução da eficiência térmica quando a porcentagem de hidrogênio adicionado excede os 5,28%, portanto este é o limite ótimo a ser adicionado à gasolina, aumentando 18% na eficiência térmica do motor (CEVIZ *et al*, 2012). No etanol, temos este limite em torno de 8% de hidrogênio adicionado, aumentando assim a eficiência em aproximadamente 4%, como podemos observar na Figura 14 (AL-BAGHDADI, 2002).

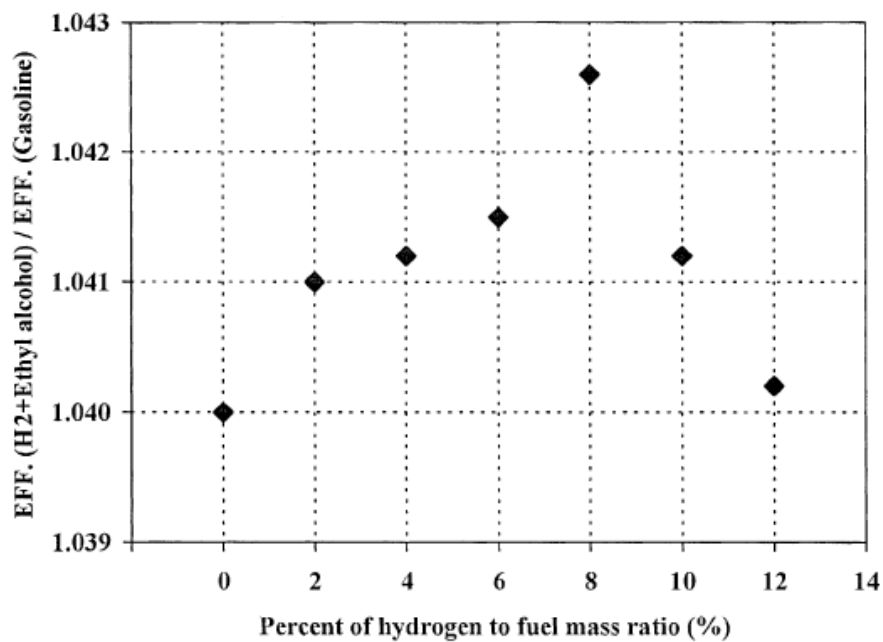


FIGURA 14 – Efeito da mistura do hidrogênio na eficiência do motor a etanol.
Fonte: AL-BAGHDADI, (2002).

Em veículos a Diesel também há a possibilidade de enriquecer a mistura com hidrogênio. Savaranan e Nagarajan (2008) apresentaram diferentes valores de mistura de hidrogênio ao diesel, mostrando suas respectivas eficiências térmicas. Tendo que, o melhor aumento de eficiência obtida foi de 5,1%, adicionando-se 30% de hidrogênio ao diesel.

Segundo Lanz *et al* (2001), quando se trata de emissão de gases poluentes, a combustão de hidrogênio com oxigênio, teoricamente, produz apenas água (Equação 10). Entretanto, pode-se também produzir óxidos nitrosos, que contribuem para o aquecimento global e para a destruição da camada de ozônio (Equação 11).



Os óxidos de nitrogênio são formados devido às altas temperaturas geradas no interior da câmara durante o processo de combustão. Esta elevada temperatura faz com que nitrogênio presente no ar se combine com o oxigênio. Alguns fatores determinam a quantidade de NO_x formados, tais como a relação ar/combustível, a

taxa de compressão do motor, a velocidade do motor, o ponto de ignição e se é feito a utilização de diluição térmica (WANG *et al*, 2009).

Dependendo das condições do motor e da estratégia operacional utilizada (variação da taxa ar/combustível, por exemplo), um motor de hidrogênio pode variar muito a emissão de óxidos de nitrogênio e produzir quantidades de monóxido de carbono significativas. A Figura 15 ilustra uma curva de NO_x em relação a razão ar/combustível para um motor a gasolina e para diferentes frações de hidrogênio adicionados (CEVIZ *et al*, 2012).

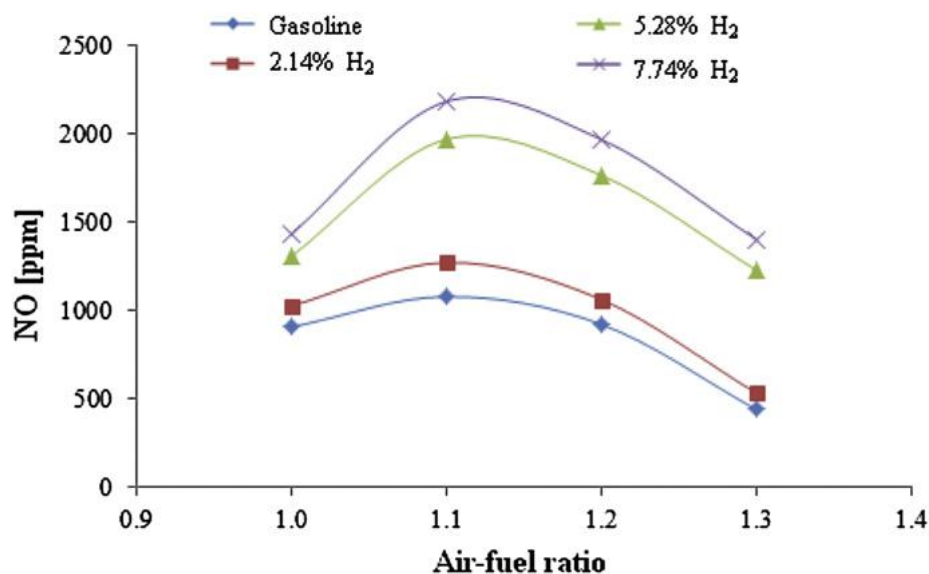


FIGURA 15 - Variação das emissões de NO_x para diferentes porcentagens de hidrogênio

Fonte: CEVIZ *et al*, (2012).

O setor automobilístico, principalmente as empresas BMW, Ford e Mazda possuem modelos de veículos movidos a hidrogênio comercializados atualmente, ou com protótipos do tipo concet. E as pesquisas e tecnologias neste âmbito estão cada vez maiores e mais evoluídas (GNÖRICH, 2008).

2.3. O HIDROGÊNIO E A USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada no rio Paraná, possui 20 unidades geradoras de energia elétrica com 14.000 MW de potência instalada, ela é

responsável pelo fornecimento de 17,3% da energia consumida no Brasil e 72,5% da energia consumida no Paraguai (ITAIPU, 2013).



FIGURA 16 – Usina Hidrelétrica de Itaipu

Fonte: ITAIPU (2013)

Para se implantar uma usina hidrelétrica em um rio, faz-se necessário a construção de uma barragem para represá-lo, formando um lago artificial que pode ter a função de acumular água para quando houver diminuição de vazão no rio e prover um desnível para a queda d'água, aumentando assim a energia potencial. No caso das usinas a fio d'água, como é o caso de Itaipu, a barragem serve principalmente para produzir o desnível necessário para acionamento das turbinas, uma vez que seu reservatório possui pequeno valor comparado com a vazão do rio (CARNIELETTO, 2011). Quando o reservatório da usina alcança sua capacidade máxima de armazenamento, o excesso será vertido. Se a demanda total já foi atendida e a usina ainda possui capacidade disponível de turbinar, diz-se que ocorreu um vertimento turbinável, a energia que poderia ser produzida a partir deste vertimento se denomina Energia Vertida Turbinável (EVT) (ESPÍNDOLA, 2008).

A energia vertida turbinável, de um modo geral, é desperdiçada pelas hidrelétricas, entretanto, o proposto pela Itaipu é a utilização da EVT para uma planta de geração de H_2 através da eletrólise da água.

No Brasil, há dois projetos em execução que também utilizam a água para produzir hidrogênio via eletrólise. Um deles é a AES Tietê, em parceria com a

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e com os Institutos Aqua Genesis e Hytron (OLIVEIRA, 2012). Outro é o projeto da Cemig (Companhia de Energia de Minas Gerais), em parceria com o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) (CARNIELETTO, 2011).

Atualmente, a Itaipu Binacional, juntamente com a Eletrobrás e a Fundação Parque Tecnológico da Itaipu (PTI), também possui um projeto de geração de hidrogênio a partir da energia vertida turbinável. A planta piloto de geração de hidrogênio que está sendo construída no Parque Tecnológico de Itaipu, conta com um eletrolisador da marca italiana H2Nitidor, o qual possui uma capacidade de produção de aproximadamente 1 Kg/h de hidrogênio, com uma pureza de 99,995%. O consumo de energia elétrica pelo eletrolisador é de 47 kWh para produzir 1 kg de hidrogênio, trabalhando em uma pressão de até 30 bar. A planta geradora possuirá um sistema de compressão do hidrogênio produzido, o qual elevará a pressão a 350 bar e assim armazenada para posterior consumo (H2Nitidor, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atender o objetivo proposto, utilizou-se de uma abordagem qualitativa, associando-se a uma abordagem histórico-contextual e interpretativa. Quanto aos fins, a pesquisa é exploratória e descritiva, na medida em que aprofunda os estudos sobre o potencial de utilização do hidrogênio, como combustível automotivo, a ser produzido na Usina Hidrelétrica de Itaipu. Quanto aos meios ela se classifica como bibliográfica e documental.

A coleta dos dados foi feita em livros, teses, dissertações e artigos científicos, tendo como principal fonte, os artigos de Al-Baghdadi (2002), Ceviz *et al* (2012) e Saravanan e Nagarajan (2008), os quais serviram de base para o estudo, pois estabelecem limites ótimos de mistura de hidrogênio em motores a combustão, utilizando etanol, gasolina e diesel, respectivamente, assim como o uso do hidrogênio em células a combustível.

Para estimar o dimensionamento de produção e o mercado consumidor do hidrogênio como combustível foram analisados elementos como: a disponibilidade de insumo, no caso a Energia Vertida Turbinável de Itaipu; o gasto de energia para produzir o hidrogênio; a capacidade de produção a partir da EVT; o total da frota de automóveis brasileiros e o consumo dos mesmos, entre outros parâmetros relevantes, a fim de prever o melhor destino final do hidrogênio produzido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta um dimensionamento da capacidade de produção de hidrogênio a partir da EVT de Itaipu, assim como a quantidade de veículos que poderiam ser abastecidos com o H_2 produzido.

Para verificar a produção de hidrogênio produzida primeiramente se levantou um histórico da quantidade de energia vertida nos últimos 12 anos, apresentado na Tabela 8. Em seguida calculou-se a média da EVT neste período. Considerou-se também para os cálculos a EVT de 2012, visto que este foi um ano com baixos valores de EVT, tomando-o assim como referência para anos onde há menor vazão. De tal forma estimou-se a produção de H_2 utilizando dois cenários, um considerando a média e o outro com um baixo desperdício de energia.

TABELA 8 – Energia vertida turbinável de Itaipu.

Ano	EVT - KWh
2000	968.000.000
2001	1.854.000.000
2002	5.167.000.000
2003	4.113.000.000
2004	3.969.000.000
2005	5.319.000.000
2006	3.637.000.000
2007	4.135.000.000
2008	2.316.000.000
2009	6.426.000.000
2010	13.210.000.000
2011	1.152.000.000
2012	1.156.000.000
Soma	53.422.000.000
Média	4.109.384.615

Segundo as especificações técnicas do eletrolisador adquirido pela Fundação PTI, o consumo de energia elétrica para produzir 1 kg de hidrogênio é em média 47 kWh. Calculou-se o potencial anual de produção de hidrogênio (Tabela 9) a partir da razão entre a EVT de Itaipu, com base na média (2000-2012), no ano de 2012 e o consumo de energia elétrica do eletrolisador.

TABELA 9 – Produção de hidrogênio a partir da EVT de Itaipu.

EVT	Produção
EVT Média (2000-2012)	87.433.715 kg
EVT 2012	24.595.744 kg

Para cálculo do consumo médio anual de hidrogênio por veículo a célula a combustível, considerou-se que um ônibus consome 0,15Kg de hidrogênio por km rodado com uma célula a combustível tipo PEM (ÔNIBUS BRASILEIRO A HIDROGÊNIO, 2008), e que cada ônibus percorre em média 75.600km/ano (RIVEROS, 2008). Na Tabela 10, tem-se que um ônibus consome em média 11.334,33 Kg de H_2 por ano.

TABELA 10 – Consumo anual de hidrogênio por ônibus a célula a combustível.

<i>Ônibus</i>	
Quilometragem média anual percorrida por veículo	75600 km
Desempenho do veículo	6,67 km/kg
Consumo médio anual de H_2	11.334,33 kg

No que se refere aos carros, de acordo com o DOE – *Department of Energy* (2010), um veículo leve percorre em média 20.921 km/ano e que o desempenho do carro a célula combustível é de 97,7 km/kg de hidrogênio (DOE, 2010). Sendo assim, a Tabela 11 mostra que o consumo médio anual por carro a célula a combustível é de 214,14 kg de hidrogênio.

TABELA 11 – Consumo anual de hidrogênio por carro a célula a combustível.

<i>Carro</i>	
Quilometragem média anual percorrida por veículo	20921 km
Desempenho do veículo	97,70 km/kg
Consumo médio anual de H_2	214,14 kg

No âmbito do uso do hidrogênio em veículos a combustão, devem ser levados em consideração os percentuais de hidrogênio na mistura com o combustível líquido, seja ele etanol, gasolina ou diesel. Conforme Al Baghdadi (2002) adicionando-se 8% em massa de hidrogênio ao etanol aumenta-se 4% a eficiência do motor. Tomou-se por base o desempenho médio de um veículo Gol 1.6, rodando

em estrada, que é 9,5 km/l de etanol (FOLHA, 2013; INMENTRO, 2013). Obteve-se o desempenho do veículo a etanol em km/kg, utilizando a fórmula da densidade ($d = m/v$). A quilometragem média percorrida por carro foi fornecida pelo DOE (2010). Os dados e resultados referente ao aumento do desempenho com a mistura ETH_2 (etanol + hidrogênio) e do consumo anual de hidrogênio por veículo a etanol estão apresentados nas Tabelas 12 e 13, respectivamente, as quais mostram que o aumento de eficiência de 4% no motor, eleva o desempenho do veículo de 11,74 km/kg para 12,21 km/kg, e que um carro rodando com 8% de hidrogênio adicionado ao etanol consome uma média de 137,24 kg de hidrogênio por ano.

TABELA 12 – Desempenho de um veículo a ETH_2 .

<i>Considerações</i>	
Densidade do Etanol	0,809 kg/l
Desempenho do veículo a Etanol	9,50 km/l
Desempenho do veículo a Etanol	11,74 km/kg
Percentual de aumento de desempenho com ET + H_2	4%
Desempenho do veículo a ETH_2	12,21 km/kg

TABELA 13 – Consumo anual de hidrogênio por veículo a etanol.

<i>Dimensionamento</i>	
Percentual de Etanol na mistura	92%
Percentual de Hidrogênio na mistura	8%
Quilometragem percorrida por carro anualmente	20.951 km
Desempenho do veículos com ETH_2	12,21 km/kg
Quantidade de ETH_2 consumidos por veículo	1.715,52 kg
Consumo de Etanol	1.578,28 kg
Consumo de Hidrogênio	137,24 kg

Para dimensionar o consumo de hidrogênio em veículos a gasolina, utilizou-se como referência o estudo de Ceziz, *et al* (2012), onde foi relatado que adicionando-se 5,23% em massa de hidrogênio à gasolina há um aumento de até 18% na eficiência do motor (Savarana e Nagarajan (2008). O desempenho médio do veículo Gol 1.6 rodando em estrada é de 13,6 km/l de gasolina, e este foi usado para realizar os cálculos (FOLHA, 2013; INMETRO, 2013). A quilometragem média

percorrida por carro foi fornecida pelo DOE (2010). A Tabela 14 apresenta resultados referente ao desempenho do veículo com a mistura de gasolina e hidrogênio (GAH_2) e a Tabela 15 mostra o consumo anual de hidrogênio por veículo a gasolina.

TABELA 14 - Desempenho de um veículo a GAH_2 .

<i>Considerações</i>	
Densidade da Gasolina	0,742 kg/l
Desempenho de veículo a Gasolina	13,60 km/l
Desempenho de veículo a Gasolina	18,33 km/kg
Percentual de aumento de desempenho com $GA + H_2$	18%
Desempenho de veículo a GAH_2	21,63 km/kg

TABELA 15 - Consumo anual de hidrogênio por veículo a gasolina.

<i>Dimensionamento</i>	
Percentual de Gasolina na mistura	94,77%
Percentual de Hidrogênio na mistura	5,23%
Quilometragem percorrida por carro anualmente	20.951 km
Desempenho do veículos com GAH_2	21,63 km/kg
Quantidade de GAH_2 consumidos por veículo	968,69 kg
Consumo de Gasolina	918,03 kg
Consumo de Hidrogênio	50,66 kg

Assim como o hidrogênio adicionado ao etanol e à gasolina, há também a possibilidade de ser adicionado hidrogênio em veículos a diesel, aumentando assim a eficiência em 5,1% se adicionado uma quantidade de 30% de hidrogênio (SARAVANAN E NAGARAJAN, 2008). No âmbito dos veículos que usam diesel como combustível nos seus motores, utilizaram-se os ônibus para dimensionar o uso de hidrogênio misturado ao diesel (DIH_2) Um ônibus roda em média 75.600 km por ano (RIVEROS, 2008) e possui um desempenho de 2,93 km/l (BORBA, 2008), os cálculos foram feitos e os resultados apresentados na Tabela 16 e Tabela 17.

TABELA 16 - Desempenho de um veículo a DIH_2 .

<i>Considerações</i>	
Densidade do Diesel	0,852 kg/l
Desempenho de ônibus a Diesel	2,5 km/l
Desempenho de ônibus a Diesel	2,93 km/kg
Percentual de aumento de desempenho com $DI + H_2$	5%
Desempenho de veículo a DIH_2	3,08 km/kg

TABELA 17 - Consumo anual de hidrogênio por ônibus a diesel.

<i>Dimensionamento</i>	
Percentual de Diesel na mistura	70%
Percentual de Hidrogênio na mistura	30%
Quilometragem percorrida por ônibus anualmente	75.600 km
Desempenho do veículos com DIH_2	3,08 km/kg
Quantidade de DIH_2 consumidos por veículo	24.514 kg
Consumo de Diesel	17.159 kg
Consumo de Hidrogênio	7.354 kg

Tomando como base os artigos apresentados, e as Tabelas 13, 15 e 17, a adição de 5,23% de H_2 eleva a eficiência do motor à gasolina em até 18%. Em relação ao etanol, que a adição é de 8% em massa e o incremento na eficiência é de 4% e ao diesel, onde mistura-se 30% de hidrogênio para aumentar a eficiência em 5%, a gasolina se apresenta como a mistura mais vantajosa.

Levando em consideração que a capacidade de produção anual de hidrogênio a partir da EVT média de Itaipu é de 87.433.715 kg; e que a capacidade a partir da EVT de 2012 é de 24.595.745 kg, obteve-se a quantidade de carros que poderiam ser abastecidos com esse hidrogênio dividindo essa produção pelo consumo de H_2 por veículo, apresentado na Tabela 18 e Tabela 19.

TABELA 18 – Total de carros por ano abastecidos a partir da EVT média (2000 – 2012).

Combustível	Consumo de H_2 por veículo (kg)	Carros Abastecidos com a EVT média
Gasolina	51	1.725.796
Etanol	137	637.078
Célula a Combustível	214	408.311

TABELA 19 - Total de carros por ano abastecidos a partir da EVT de 2012.

Combustível	Consumo de H_2 por veículo (kg)	Carros Abastecidos com a EVT de 2012
Gasolina	51	485.479
Etanol	137	179.215
Célula a Combustível	214	114.861

Objetivando dimensionar o mercado do hidrogênio produzido a partir da Energia vertida turbinável de Itaipu, foram levantados dados referentes à frota veicular do Brasil, do estado do Paraná, da Região Oeste do Paraná e de Foz do Iguaçu. Entretanto, foi considerada para o estudo uma fatia de mercado para utilização do hidrogênio produzido - carros Total-Flex novos vendidos entre janeiro de 2007 e janeiro de 2013 (ANFAVEA, 2013). Estes carros representam aproximadamente 32% da frota total dos carros no Brasil atualmente, que é de 43.541.296 (DENATRAN, 2013) Nas Tabelas 20 e 21 estão apresentados os percentuais da frota de carros Total-Flex vendidos no período de janeiro de 2007 à janeiro de 2013 que poderiam ser abastecidos a partir da EVT média e da EVT de 2012, respectivamente, para diferentes localidades.

TABELA 20 – Percentual de carros por ano abastecidos a partir da EVT média (2000 – 2012).

	Gasolina	Etanol	Célula a Combustível
Carros no Brasil	14.025.058	14.025.058	14.025.058
%	12,30	4,54	2,91
Carros no Paraná	1.155.701	1.155.701	1.155.701
%	149,32	55,12	35,33
Carros na Região Oeste (PR)	137.677	137.677	137.677
%	1.253,50	462,73	296,57
Carros em Foz do Iguaçu	25.863	25.863	25.863
%	6.672,79	2.463,26	1.578,73

TABELA 21 – Percentual da frota por ano abastecida a partir da EVT de 2012.

	Gasolina	Etanol	Célula a combustível
Carros no Brasil	14.025.058	14.025.058	14.025.058
%	3,46	1,27	0,82
Carros no Paraná	1.155.701	1.155.701	1.155.701
%	42,01	15,51	9,94
Carros na Região Oeste (PR)	137.677	137.677	137.677
%	352,62	130,17	83,43
Carros em Foz do Iguaçu	25.863	25.863	25.863
%	1877,11	692,93	444,11

Os resultados obtidos apontam que a nível de Brasil, a produção de Itaipu é insuficiente para abastecer a fatia de mercado proposta. Porém, se considerar o Paraná e a média da EVT dos anos de 2000 a 2012 (Tabela 20), observa-se que a utilização da mistura de hidrogênio à gasolina pode suprir mais de 100% da fatia de mercado de automóveis proposta. Assim como os carros na região oeste do estado, a Itaipu poderia suprir 3 vezes mais a demanda dos carros a hidrogênio e gasolina, supriria mais de 100% dos automóveis a hidrogênio e etanol, e aproximadamente 83% dos carros movidos a célula a combustível.

No que diz respeito aos ônibus foi considerado o montante da frota de ônibus, que é de 517.027, aproximadamente (ANFAVEA, 2013).

TABELA 22 – Total de ônibus abastecidos por ano com a EVT média (2000 – 2012).

Combustível	Consumo de H_2 por ônibus (kg)	Ônibus Abastecidos com a EVT média
Diesel	7.354	11.889
Célula a Combustível	11.334	7.714

TABELA 23 - Total de ônibus abastecidos por ano a partir da EVT de 2012.

Combustível	Consumo de H_2 por ônibus (kg)	Ônibus Abastecidos com a EVT de 2012
Diesel	7.354	3.344
Célula a Combustível	11.334	2.170

TABELA 24 – Percentual de ônibus abastecidos por ano com a EVT média (2000 – 2012).

	Diesel	Célula a Combustível
Ônibus no Brasil	517.027	517.027
%	2,30	1,49
Ônibus no Paraná	35.303	35.303
%	33,67	21,85
Ônibus na Região Oeste (PR)	4.031	4.031
%	294,93	191,36
Ônibus em Foz do Iguaçu	1.013	1.013
%	1173,62	761,50

TABELA 25 – Percentual de ônibus abastecidos por ano a partir da EVT de 2012.

	Diesel	Célula a Combustível
Ônibus no Brasil	517.027	517.027
%	0,65	0,42
Ônibus no Paraná	35.303	35.303
%	9,45	6,15
Ônibus na Região Oeste (PR)	4.031	4.031
%	82,96	53,83
Ônibus em Foz do Iguaçu	1.013	1.013
%	330,15	214,21

Com os percentuais apresentados, o que se pode observar é que a quantidade de carros e ônibus a célula a combustível que a Itaipu pode abastecer é consideravelmente menor do que os automóveis a combustão, os quais misturam hidrogênio a outros combustíveis, sendo assim, a Itaipu poderia atender um mercado maior se as misturas forem utilizadas. Analisando as tabelas apresentadas, observa-se também a vantagem em se utilizar hidrogênio na mistura em veículos leves, frente ao uso em ônibus, pois adiciona-se 30% de hidrogênio em ônibus, o que aumenta significativamente o consumo de hidrogênio.

5. CONCLUSÃO

Todos estes aspectos são relevantes do ponto de vista do planejamento energético, já que um bom planejamento e análise dos diferentes setores envolvidos são as bases que podem possibilitar a inserção do hidrogênio no setor de transportes como uma alternativa energética válida.

No caso do Brasil, considerando o grande potencial hidráulico do país, a utilização da EVT para obter o hidrogênio torna-se uma opção importante, tanto para a sociedade quanto para as empresas de energia elétrica. Se de um lado a sociedade pode se beneficiar com o uso de uma tecnologia relativamente mais limpa e energeticamente eficiente, de outro as empresas de energia elétrica podem diversificar os produtos a serem ofertados. Isto significa dizer que se abre um novo mercado de atuação para as empresas do setor elétrico: o de produção e venda de hidrogênio eletrolítico.

Como apresentado no trabalho, há diversas formas de se produzir hidrogênio, que associados à EVT podem suprir ainda mais a demanda de hidrogênio veicular, assim como para outras aplicações.

Vale ressaltar que atualmente o custo final do hidrogênio ainda é pouco competitivo quando comparando com os combustíveis convencionais. No entanto, esta competitividade pode aumentar significativamente quando são incorporados os custos ambientais do uso de combustíveis fósseis a partir de tecnologias tradicionais ou os benefícios econômicos da comercialização dos créditos de carbono provenientes do uso de tecnologias com fontes renováveis, como é o caso das células a combustível alimentadas com hidrogênio proveniente da eletrólise da água.

Contudo, no momento atual, no Brasil, se torna uma alternativa viável a mistura de hidrogênio aos combustíveis convencionais em motores a combustão interna, uma vez que com o advento do pré-sal, o Brasil continuará utilizando os combustíveis fósseis na sua matriz energética. Uma forma de amenizar os problemas relacionados ao uso dos combustíveis fósseis seria a mistura do hidrogênio a esses combustíveis, pois além de aumentar consistentemente a eficiência do veículo, diminuiria o uso dos combustíveis fósseis, diminuiria a produção de CO_2 e CO, mitigando assim os efeitos de poluição e acúmulo de gases de efeito estufa. Outro fator relevante é que os ajustes necessários no motor a

combustão são pequenos em relação a criação de uma nova cadeia produtiva de automóveis movidos a célula a combustível, principalmente em um país com as extensões do Brasil, onde os investimentos por parte do governo e da iniciativa privada são pequenos e a estruturação da cadeia demorada.

De acordo com o proposto, foi dimensionado a capacidade de produção de hidrogênio a partir da energia vertida turbinável da usina de Itaipu, assim como a quantidade de veículos que podem ser abastecidos com o hidrogênio produzido.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-BAGHDADI, M. A. S. **A study on the Hydrogen-ethyl alcohol dual fuel spark ignition engine.** Energy Conversion and Management, Vol 43, p199-204, 2002.

ALMEIDA, A. T. e MOURA, P. S. **Hidrogênio e células de combustível.** Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Gazeta da Física, p51-55, 2005.

BARBIR, F. **PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources.** Solar Energy, v.78, p. 661-669, 2005.

BALL, M. e WIESCHEL, M. **The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges.** Cambridge University, 2009.

BASU, S. **Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology.** Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, India. 2007.

BERNARDE JR, P. **Alternativas para a Produção de Hidrogênio nas Regiões Brasileiras Visando a Geração de Energia Elétrica Distribuída.** Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo – SP, 153p. 2009.

BEZERRA FILHO, J. G. **Células a combustível a hidrogênio: estudo de caso comparativo com um motor a combustão.** Trabalho de final de curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Mecatrônica Industrial, 70p. 2008.

BOCKRIS, J. O'M. *et al.* **Comprehensive Treatise of Electrochemistry.** Vol 2. Plenum Press, New York, 1981.

BORBA, B. S. M. C. **Metodologia de Regionalização do Mercado de Combustíveis Automotivos no Brasil.** Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

BP – BEYOND PETROLEUM. **Statistical Review of World Energy.** Inglaterra, Junho, 2007.

CARNIELETTO, R. **Aproveitamento de Energia Vertida Turbinável para Produção de Hidrogênio e Geração Distribuída.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria, 174p, 2011.

CEMIG. **Alternativas Energéticas: Uma Visão Cemig.** Companhia Energética de Minas Gerais, Belo horizonte, p164-170, 2012.

CEVIZ, M. A. *et al.* **Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variation in a lean-burn SI engine fueled by gasoline-hydrogen blends.** Applied Thermal Engineering, Vol 36, p314-324, 2012.

CHESF – Companhia Hidrelétrica do São Francisco. **Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário/ Tecnologias.** Vol 4, 1987.

CHIA, E. **A chemical reaction engineering perspective of polymer electrolyte membrane fuel cells.** Princeton University, 168p. 2006.

COOK, B. **An introduction to fuel cells and hydrogen technology.** Heliocentris. Vancouver, Canadá. 31p, 2001.

EPE – BRASIL, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2012.** Ministério de Minas e Energia, 2012.

ESPÍNDOLA, M. O. G. **Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica do Aproveitamento da Energia Vertida Turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu para Síntese de Amônia.** Universidade Estadual de Campinas (Tese de Mestrado), 2008.

ESPÍNDOLA, M. O. G. **Estudio de La Viabilidad Técnica y Económica Del Aprovechamiento de La Energía Vertida Turbinável de La Central Hidroeléctrica de Itaipú para La Síntesis de Amoníaco para Fertilizantes Nitrogenados.** VIII Seminário Del Sector Electirco Paraguay – CIGRÉ. p1-7, 2008.

ESTEVES, G. R. T. **Custo da Poluição dos Transportes na Saúde Pública na Região Metropolitana de São Paulo.** Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2007.

FRANCHI, T. P. **Utilização de Células a Combustível tipo PEM como Alternativa na Geração Auxiliar em Instalações Elétricas de Grande Porte.** Dissertação de mestrado. USP, 2009.

GAMBETTA, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de caso aproveitando a EVT da UHE de Itaipú.** Dissertação de Mestrado-Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade de Campinas, 163p, 2010.

GANESH, R. H. *et al.* **Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study.** Renewable Energy, India, p1324-1333, 2007

GELLER, H. S. **Revolução Energética. Políticas para um Futuro Sustentável.** Rio de Janeiro: Relume Dumará, p15-46, 2003.

GNÖRICH, B. **Hydrogen Internal Combustion Engine.** Roads2 Hy, 2008. Disponível em: <http://www.ika.rwthachen.de/r2h/index.php/Hydrogen_Internal_Combustion_Engine> Acesso em: 25/06/13.

GODOY, G. A. R. **Aproveitamento da Energia Vertida Turbinável da UHE Itaipu para uso em ônibus a hidrogênio: estudo de caso em Foz do Iguaçu.** Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade de Campinas, 123p, 2008.

GOMES NETO, E. H. **Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível.** Curitiba, Brasil H2 Fuel Cell Energy, 240p. 2005.

GUPTA, P. K. **Performance evaluation of a hydrogen-fuelled spark ignition engine using electronically controlled solenoid-actuated injection system.** Centry for Energy Studies. Indian Institute of Technology, V353, New Dehli, India, 2000.

HARRIS, J M. *et al.* **A Survey of Sustainable Development: Social and Economic Dimensions.** Washington, D.C.: Island Press, 2001.

HOFFMANN, P. **Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet.** Cambridge, MA: MIT Press, 2001

HOOGERS, G. **Fuel Cell Technology Handbook.** Library of Congress Cataloging, USA, 2003.

HURLEY, P. **Build a solar hydrogen fuel cell system.** Detroit: Ed. Wheelock Mountain Publications, 2004.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook.** Paris, França, 698p. 2009.

IVY, J. **Summary of Electrolytic Hydrogen Production, Mileston Completion Report.** NREL/MP-560-36734. Setembro, 2004.

KAMIL, M. *et al.* **Performance Evaluation of External Mixture Formation Strategy in Hydrogen Fueled Engine.** Journal of Mechanical Engineering and Sciences. Vol 1, p 87-98, 2011.

LANZ, A. **Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies.** College of the Desert, 2001.

LOPES, R. A. **Célula combustível a hidrogênio: Fonte de energia da nova era.** São Paulo, Ed. Artliber, 2004.

LYMBEROPOULOS, N. **Centre of Renewable Energy.** 2005. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells>>, Acesso em: 03, jun. 2013.

MARQUES, A. R. *et al.* **O Hidrogénio como Vector Energético nos Transportes.** Seminários De Desenvolvimento Sustentável. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.

MELLO, L. F. e HOGAN, D. J. **Dinâmica Populacional e Mudança Ambiental: Cenários para o Desenvolvimento Brasileiro.** População, Consumo e Meio Ambiente. Campinas: NEPO – UNICAMP, p59-72, 2007.

NEVES JÚNIOR, N. P. **Produção de hidrogênio através da eletrólise.** Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.cenergia.org.br/fontes/down/eletr.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2013.

NMSEA, NEW MEXICO SOLAR ENERGY ASSOCIATION. **Electrolysis: Obtaining hydrogen from water: The Basis for a Solar-Hydrogen Economy.** Albuquerque, 2004. Disponível em: <http://www.nmsea.org/Curriculum/7_12/electrolysis/electrolysis.htm>. Acesso em: 03, jun, 2013.

NORBECK, J. M. **Hydrogen fuel for surface transportation.** New York, Ed. Society of Automotive Engineers, 2003.

NORTH, D. C. **An Investigation of Hydrogen as an Internal Combustion Fuel.** Department of Mechanical Engineering, San Jose State University, California, U.S.A., 1992

OLIVEIRA, J. J. **AES Tietê adota hidrogênio em novo processo de geração.** Jornal Valor Econômico, 2012. Disponível em <<http://www.unicamp.br/unicamp/clipping/2012/05/18/aes-tiet%C3%AA-adota-hidrog%C3%AAnio-em-novo-processo-de-gera%C3%A7%C3%A3o>> Acesso em: 09/07/2013.

ÔNIBUS BRASILEIRO A HIDROGÊNIO **Tecnologias Renováveis para o Transporte Urbano no Brasil.** EPRI International, 2008.

PARIZZI, J. B. **Utilização Avançada da Capacidade Excedente de Sistemas de Transmissão CCAT para produção de Oxigênio e Hidrogênio.** Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (Tese de Doutorado), 208 p, 2008

PERLES, C. E. **Propriedades Físico-Químicas Relacionadas ao Desenvolvimento de Membranas de Nafion® para Aplicações em Células a Combustível do tipo PEMFC.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº 4, p. 281-288, 2008

SANTOS, A. M. R. **Tendências Tecnológicas das Células a Combustível para o Uso do Hidrogênio Derivado de Petróleo e Gás Natural.** Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campians, 130 p. 2008.

SANTOS JR, A. C. F. **Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas: estudo de caso em ITAIPU.** Dissertação de mestrado (Pós-graduação em engenharia de produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, 143p. 2004.

SARAVANAN, N., NAGARAJAN, G. **An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system.** International Journal Of Hydrogen Energy, Vol 33, p 1769 – 1775, 2008.

SILVA, E. P. **Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio.** Campinas: Editora da UNICAMP, 204p. 1991.

SILVEIRA, D. M. **Produção de Hidrogênio a partir de Bioetanol.** Escola de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

SORENSEN, B. **Hydrogen and Fuel Cells**, Academic Press, 2005.

SOUZA, S. N. M. **Aproveitamento de Energia Hidroelétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico.** Tese de Doutorado, Universidade de Campinas – SP, 211p. 1998.

SPIEGEL, C. **PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB.** British Library Cataloguing, 2008

THAMPAN, T. *et al.* **Modeling of conductive transport in proton-exchange membranes for fuel cells.** Journal Electrochem, 2000.

TOLMASQUIM, M. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Interciência/CENERGIA, 2003.

TÜV. **Hydrogen - a world of energy.** TÜV Süddeutschland Holding AG. Federal Republic of Germany, 2003.

ULLMANN'S. **Hydrogen, Encyclopedia of Industrial Chemistry.** Federal Republic of Germany, 1989.

WANG, S. e JI, C. **Effect of Hydrogen Addition on Combustion and Emissions Performance of a Spark Ignition Gasoline at Lean Conditions.** Journal National of Hydrogen Energy. Vol 34, p 7823-7834, 2009.

WENDT, H. *et al.* **Tecnologia de Célula a Combustível.** Química Nova, p 538-546, 2000.

ZOULIAS, N. *et al.* **A Review on Water Electrolysis**, TCJST 4, p. 41-71, 2004.